

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica



**“ANÁLISE DA INJEÇÃO DE AR COMO ALTERNATIVA
PARA A REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE
EMBARCAÇÕES”**

TÚLIO JAGUAR DA CUNHA

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto/2013

ANALISE DA INJEÇÃO DE AR COMO ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DA
RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE EMBARCAÇÕES

TÚLIO JAGUAR DA CUNHA

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NAVAL.

Aprovado por:

Alexandre Teixeira de Pinho Alho, D.Sc.
(Orientador)

Severino Fonseca da Silva Neto, D.Sc.

Carl Horst Albrecht, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto/2013

Projeto Final apresentado ao DENO como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Naval.

ANALISE DA INJEÇÃO DE AR COMO ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE EMBARCAÇÕES

TÚLIO JAGUAR DA CUNHA

AGOSTO/2013

Orientador: Alexandre Teixeira de Pinho Alho

Departamento: Engenharia Naval e Oceânica

Resumo do Trabalho:

O presente projeto de graduação tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico em CFD (Computational Fluid Dynamics) aplicado à análise da efetividade da injeção de ar como alternativa para a redução da resistência ao avanço de embarcações. O modelo desenvolvido possui particular ênfase na descrição do campo de escoamento bifásico ao redor do casco. A efetividade da injeção de ar para a redução da resistência friccional foi avaliada tendo como referência o casco de uma embarcação de competição movida à energia solar.

A avaliação foi conduzida através de simulações numéricas, via CFD (Computational Fluid Dynamics), do escoamento ao redor do casco. O pacote comercial ANSYS CFX, versão 14.0, foi utilizado para o desenvolvimento do modelo numérico. O modelo matemático adotado pelo código ANSYS CFX é baseado na solução implícita das equações RANS, discretizadas pelo método dos volumes finitos em todo o domínio fluido.

As análises foram feitas para três diferentes velocidades (8,10 e 12 nós). Os resultados obtidos foram bastante otimistas, tendo alcançado uma diminuição de 19,2% na resistência ao avanço da embarcação em relação ao casco original para a maior velocidade.

Dedicatória

Aos meus pais, meu maior apoio.

Índice

Agradecimentos	v
1. Introdução	1
2. Injeção de Ar para a Redução da Resistência ao Avanço	2
3. Metodologia	4
4. Casco de Referência.....	5
4.1 Seleção do Método de Injeção de Ar	7
4.2 Geometria do Casco: Original e com Cavidade	8
5. Modelo Numérico	11
5.1 Geração do domínio Fluido e da Malha Computacional.....	12
5.2 Configuração do Modelo Numérico.....	15
5.3 Verificação da Independência da Malha Computacional.....	16
6. Apresentação e Análise dos Resultados.....	19
6.1 Casco Original.....	19
6.2 Casco com cavidade e sem fechamento na popa.....	23
6.3 Casco com cavidade e fechamento na popa	26
7. Conclusões	30
8. Referências Bibliográficas	31

AGRADECIMENTOS

“Quem caminha sozinho pode até chegar mais rápido, mas aquele que vai acompanhado, com certeza vai mais longe.”

Pessoas a agradecer são muitas, mas tentarei ser breve. Gostaria de demonstrar minha maior gratidão a minha família, que sempre esteve ao meu lado e me apoiou em todas as minhas decisões. Devo o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico a eles, Goethe Jaguar da Cunha e Márcia Margarete Fagundes, que me disponibilizaram todos os recursos necessários para tal. Um obrigado também para meu irmão Thiago Luis Fagundes, uma pessoa que sei que estará ao meu lado, sempre que for preciso. Lembranças a meus avós, tios, primos e todo o restante da família.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos da vida. Digo da vida, porque foram aqueles que acompanharam meu crescimento e que convivem comigo até hoje. Alguns se distanciaram, mas com toda a certeza, sei que ainda querem o meu sucesso. Obrigado amigos do Colégio Santo Inácio, Intercâmbio e Faculdade, parte dessa etapa vencida foi graças a vocês.

Gostaria de agradecer especialmente à minha dupla de projetos, Gabriel Tancredi, que foi vencendo junto comigo todas as dificuldades da faculdade, que me levantou quando precisei e que estará junto comigo na colação. Preciso mandar um agradecimento também ao amigo Júlio Cesar, pois se não fosse a sua ajuda esse projeto não teria sido terminado a tempo. Obrigado pela paciência.

A todos os professores do curso de Engenharia Naval e Oceânica, agradeço os ensinamentos que me passaram. Devo grande parte da minha formação a vocês.

Por último, agradeço ao meu orientador Alexandre Teixeira de Pinho Alho, que junto comigo tornou real um projeto que um dia esteve em nossos imaginários. Desejo a ele e a família toda a felicidade e muitas realizações na vida. Que seus projetos continuem dando certo e que alcance todos os seus objetivos.

Eu espero que cada pessoa citada acima continue fazendo parte da minha vida e que possa compartilhar comigo muitas outras realizações.

1. INTRODUÇÃO

A minimização da resistência ao avanço representa um objetivo central no projeto das linhas do casco de uma embarcação. Este aspecto torna-se ainda mais relevante quando o objeto de interesse do projeto consiste em uma embarcação empregada em competições. Neste caso, a redução da resistência ao avanço representa uma vantagem competitiva, fundamental para a garantia de um melhor desempenho em termos de velocidade máxima.

A resistência ao avanço experimentada pelo casco de uma embarcação possui duas principais componentes: uma devido ao campo de tensões tangenciais, denominada de resistência friccional, e outra devido ao campo de pressões, cujas principais componentes consistem na resistência de geração de ondas e na resistência de forma. A resistência friccional representa, geralmente, a principal componente de resistência ao avanço de embarcações de deslocamento e semi-deslocamento/planeio. É intuitivo deduzir que a resistência friccional é diretamente relacionada à superfície molhada do casco, ou seja, o casco de menor resistência friccional é aquele que possui o menor valor de superfície molhada. Todavia, há um limite para a redução da superfície molhada tendo em vista a garantia de um valor de deslocamento de projeto.

Uma alternativa para a redução da resistência friccional consiste na alteração das características do fluido em contato com o casco. O atrito com um fluido de menor viscosidade resultará na redução da resistência friccional do casco e, conseqüentemente, da resistência total ao avanço. Tal objetivo pode ser alcançado por meio da interposição de uma camada de ar entre o casco e a água.

O presente projeto de graduação tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico em CFD (Computational Fluid Dynamics) aplicado à análise da efetividade da injeção de ar como alternativa para a redução da resistência ao avanço de embarcações. O modelo desenvolvido possui particular ênfase na descrição do campo de escoamento bifásico ao redor do casco. A efetividade da injeção de ar para a redução da resistência friccional foi avaliada tendo como referência o casco de uma embarcação de competição movida à energia solar.

2. INJEÇÃO DE AR PARA A REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO

A demanda contínua pela redução da resistência ao avanço das embarcações resultou em diversas alternativas aplicadas ao projeto dos cascos. Uma das alternativas desenvolvidas para a redução da resistência friccional consiste na interposição de uma camada de ar entre a água e o fundo do casco, com o objetivo de redução do atrito. A área do casco exposta à camada de ar experimenta um menor atrito em função do menor valor de viscosidade dinâmica do ar comparativamente à água.

Tabela 1: Patentes referentes a cascos projetados para a operação com injeção de ar (EUA).

Date	Item	US Patent
1882	Flat bottom planing hull with air injection	R.P. Pietet (1882) No. 251, 793
1908	Round bottom hull with bottom air injection	W.B. Motheral (1908) No. 900, 286
1910	Planing hull with steps filled with adjustable tab	W.H. Fauber (1910a) No. 956, 487
1910	V bottom planing hull with steps	W.H. Fauber (1910b) No. 971, 029
1912	Planing hull with ventilated steps	W.H. Fauber (1912) No. 1,024, 682

De acordo com Latorre (1995), os primeiros estudos relacionados à injeção de ar como alternativa para a redução da resistência ao avanço datam do final do século XIX. Na Tabela 1 são listadas as patentes depositadas nos Estados Unidos da América, até a primeira guerra mundial, referentes a cascos projetados para a operação com injeção de ar. As pesquisas sobre o tema da injeção de ar para a redução do arrasto de embarcações encontram-se em pleno desenvolvimento nos dias atuais (Ceccio e Mäkiharju, 2012). Atualmente, alguns fabricantes já adotam soluções envolvendo a injeção de ar em alguns de seus modelos de série, tal como o construtor francês Beneteau (Figura 1).

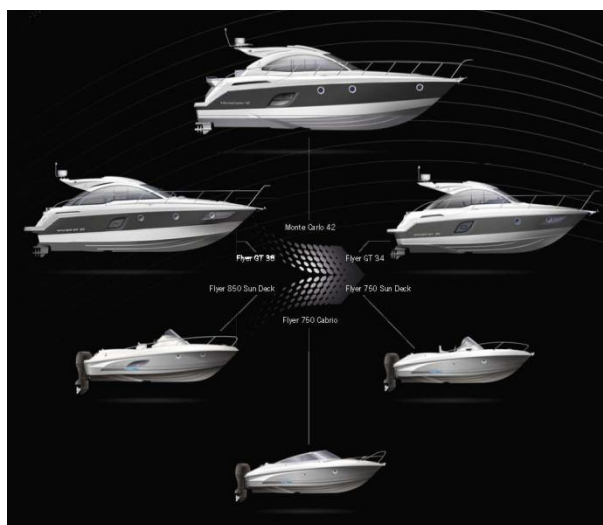


Figura 1: Modelos de série de lanchas equipadas com tecnologia de injeção de ar (www.beneteau.com).

Em linhas gerais, a injeção de ar sob o casco de uma embarcação pode ser realizada através de dois métodos:

- ❑ Injeção Natural: o ar entra por uma abertura no costado ou convés e flui naturalmente por um duto até o fundo do casco onde permanece confinado, formando um colchão. Esse método é geralmente utilizado em embarcações rápidas, em que a própria velocidade da embarcação permite a formação da camada de ar; e
- ❑ Injeção Artificial: o ar é comprimido (compressor) e injetado no fundo do casco, formando um colchão. Neste método, há, portanto, um gasto de energia para a injeção de ar, sendo necessário estudar o compromisso entre a potência gasta para a injeção de ar e a redução obtida na resistência ao avanço. A utilização do compressor garante ao ar a pressão necessária para a formação do colchão (Lay. et al., 2010). Uma vantagem desse método é que a pressão na cavidade se torna maior que a pressão atmosférica, podendo fornecer sustentação adicional ao casco. Além do mais, é mais fácil controlar a pressão de injeção e com isso a extensão da camada.

De acordo com Doğrul (2010), o ar injetado sob o casco pode se comportar de três maneiras:

- ❑ Confinado em uma cavidade: nesse caso, o fundo do casco precisa ser modificado e o ar injetado permanece confinado na cavidade formada. A Figura 2 (Matveev, 1999) ilustra um casco modificado com cavidade para o confinamento do ar;

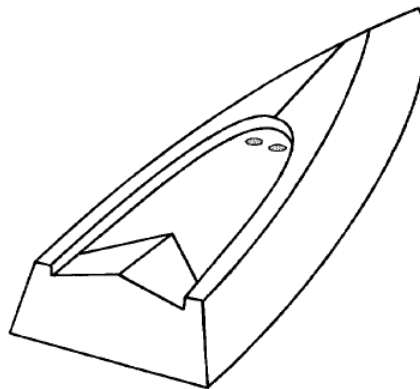


Figura 2: Geometria de um casco adaptado para confinamento de ar no fundo.

- ❑ Micro-bolhas: neste caso, o fundo do casco não necessita de modificações. Há apenas a injeção de micro-bolhas de ar que se misturam com a água, diminuindo a viscosidade do fluido em volta do casco. Esse método muitas vezes leva ao escapamento das bolhas. Estudos feitos (Kakugawa et al., 2000) mostraram algumas vantagens desse método, contudo ainda é difícil saber o quanto de ar deve ser injetado, a influência do diâmetro das bolhas, a melhor forma de injetar o ar, etc.;

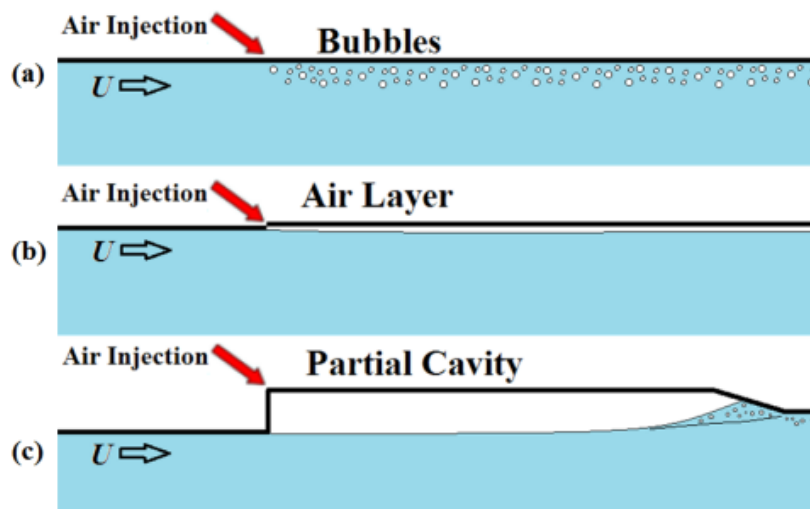


Figura 3: (a) Micro-bolhas; (b) Filme fino de ar e (c) Cavidade de ar.

- Filme fino de ar: neste caso, o casco também não precisa ser modificado. A injeção de uma fina camada de ar é realizada, diminuindo o contato do casco com a água. Contudo, este método exige que os movimentos da embarcação sejam de pequena amplitude, de modo a evitar o vazamento de ar para a atmosfera.

A Figura 3 ilustra de forma qualitativa o comportamento do ar nas três condições usualmente observadas. Eventualmente, a camada de ar não chega a ser formada sob o casco ou não ocupa toda a cavidade. Porém, a mistura do ar com a água diminui a viscosidade do fluido ao redor do casco e, conseqüentemente, a resistência ao avanço.

3. METODOLOGIA

No presente trabalho, a avaliação da efetividade da utilização da injeção de ar como alternativa para a redução da resistência ao avanço foi conduzida através de simulações numéricas, via CFD (Computational Fluid Dynamics), do escoamento ao redor do casco. O pacote comercial ANSYS CFX, versão 14.0, foi utilizado para o desenvolvimento do modelo numérico. O modelo matemático adotado pelo código ANSYS CFX é baseado na solução implícita das equações RANS, discretizadas pelo método dos volumes finitos em todo o domínio fluido.

O modelo numérico foi desenvolvido com base na geometria em escala real da embarcação de referência, sendo adotado o programa ICEM CFD, versão 14.0, para a geração da geometria e respectivos domínio e malha computacional. Em função da adoção da hipótese de simetria do escoamento (cascos esbeltos), o modelo numérico incorpora apenas um dos bordos do casco. Tal opção é particularmente útil para a redução do esforço computacional necessário a execução das simulações.

A efetividade da injeção de ar como opção para a redução do arrasto foi conduzida através de uma análise comparativa da resistência ao avanço do casco de referência em ambas as condições: casco original (sem injeção de ar) e casco modificado (com injeção de ar).

4. CASCO DE REFERÊNCIA

O presente projeto foi desenvolvido tendo como referência o casco de uma embarcação de competição movida à energia solar. A embarcação objeto de interesse deste trabalho, de nome OXÚM (Figura 4), foi especialmente projetada para a edição de 2012 da competição internacional de embarcações solares DONG Energy Frisian Solar Challenge, realizada bianualmente na Holanda.

O casco desenvolvido representa uma parceria entre a equipe Vento Sul, pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina, e o Laboratório de Sistemas de Propulsão, vinculado ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica/UFRJ, cujo objetivo foi centrado no projeto de uma embarcação competitiva, com a qual o Brasil pudesse almejar o título da competição. Em sua primeira participação, a embarcação OXÚM mostrou um excelente desempenho, mantendo-se sempre entre os primeiros colocados nas diversas etapas realizadas, cabendo ressaltar o 3º lugar na última prova da competição e o 7º lugar na classificação geral.

O bom desempenho obtido na edição de 2012 confirmou o sucesso da parceria UFSC/UFRJ e estimulou sua continuidade, resultando na proposta do desenvolvimento de um novo casco mais eficiente para a edição a ser realizada em 2014. Propõe-se para o novo casco a utilização da injeção de ar como alternativa para a redução da resistência ao avanço e o consequente aumento da velocidade média que a embarcação poderá manter nas diversas etapas da competição.



Figura 4: Equipe Vento Sul, barco OXÚM (*Frisian Solar Challenge*, 2012).

Tabela 2: Dimensões principais do casco OXÚM, versão 2012.

Comprimento total:	6,00 m
Boca (Linha d'água de projeto):	0,44 m
Pontal máximo:	0,39 m
Calado máximo:	0,18 m

Na Tabela 2 são apresentadas as dimensões principais do casco OXÚM, versão 2012. Considerando-se que a principal componente de resistência do casco é a componente friccional, o casco OXÚM foi projetado de modo a possuir uma baixa relação área molhada/volume de carena. Para tal, as obras vivas do casco apresentam balizas em formato de arcos de círculo, o que garante a melhor relação área/volume. De modo a minimizar a componente de resistência de geração de ondas, a proa do casco é caracterizada por costados verticais e um reduzido ângulo de entrada. Na Figura 5 é apresentado o plano de balizas do casco.

O casco é equipado com um motor de propulsão elétrico de 1.500 W, o qual, em condições de prova, permite ao casco atingir velocidades da ordem de 13 nós. Nas diversas etapas da competição, a embarcação navega em velocidades médias que variam entre 6,0 e 12,0 nós. A faixa de número de Froude observada; onde

$$F_N = \frac{V}{\sqrt{gL_{wl}}}, \quad (1)$$

sendo, V a velocidade do casco, g a aceleração da gravidade e L_{wl} o comprimento de linha d'água, resulta em

$$F_N = 0,402..0,804.$$

Tais características de velocidade caracterizam as condições operacionais do casco como sendo de semi-planeio, condições estas particularmente favoráveis à utilização da injeção de ar como alternativa para a redução da resistência ao avanço. Outras opções para a redução da resistência ao avanço, tais como a utilização de hidrofólios, encontram como limitante o valor de potência elétrica disponível na embarcação da ordem de 1.750 Wh.

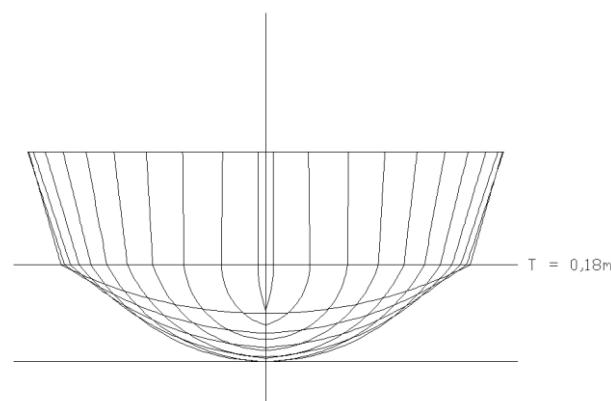


Figura 5: Plano de balizas do casco OXÚM, versão 2012.

4.1 SELEÇÃO DO MÉTODO DE INJEÇÃO DE AR

A estratégia básica da competição é a utilização eficiente da energia solar, captada através de painéis fotovoltaicos, para a propulsão da embarcação. Assim sendo, evita-se a instalação de outros consumidores elétricos além do motor de propulsão. Considerando este pressuposto, é imediato concluir ser o método de injeção natural de ar o mais adequado para o presente projeto.

A competição DONG Energy Frisian Solar Challenge é realizada em canais que circulam o interior da região de Frisian, localizada no norte da Holanda, cujas condições ambientais típicas são caracterizadas pela ausência de ondas e vento. Tais características permitem a adoção da solução baseada na formação de um colchão de ar confinado em uma cavidade sob o casco, ao considerar-se a hipótese de pequenas amplitudes de movimento e, consequentemente, pouco vazamento e boa estabilidade da camada de ar.

De modo a proporcionar condições satisfatórias para a formação do colchão de ar, este deve ser admitido em uma região do fundo na qual sejam observados baixos valores de pressão dinâmica. Contudo, deve-se considerar também que quanto mais extenso for o colchão de ar melhores serão os resultados obtidos em termos de redução do arrasto. Assim sendo, é preciso observar tanto a extensão quanto a posição da cavidade sob o casco. A combinação mais eficiente de ambos estes aspectos consiste em uma cavidade a qual se estende desde o ponto de maior calado (menor pressão dinâmica), localizado a 40% do comprimento de linha d'água, até o espelho de popa.

Ademais, a cavidade deve ser limitada por “paredes” posicionadas em cada bordo, que impeçam o vazamento do ar. Como pode ser visto na Figura 2, o fechamento da cavidade deve ser feito de forma suave de modo a não perturbar de forma abrupta o escoamento, o que poderia causar efeitos negativos em termos da resistência ao avanço (formação e descolamento de vórtices). Outra questão de fundamental importância relacionada ao fechamento suave na popa é evitar que ar vaze rapidamente, o que levaria ao colapso do colchão.

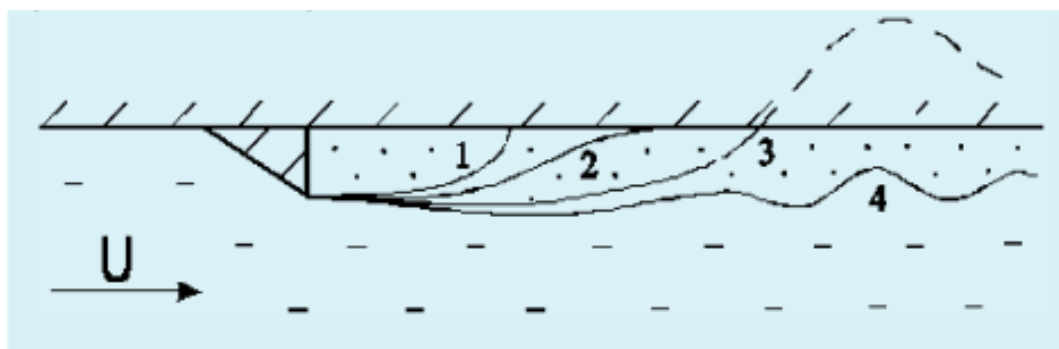


Figura 6: Configurações observadas na formação do colchão de ar.

Cabe ressaltar que a cavidade criada no fundo do casco resulta em uma perda de volume, o que, para um mesmo valor de deslocamento, impõe o aumento do calado da embarcação. Isso deve ser levado em consideração, já que este aumento no calado leva a um acréscimo na área molhada do casco, e, conseqüentemente, na resistência friccional. Obviamente, a efetividade da utilização de injeção de ar é função da relação entre a redução da resistência friccional devido à formação do colchão de ar e seu inevitável aumento decorrente do aumento do calado.

Matveev (2003) apresenta um estudo sobre as condições de formação do colchão de ar sob o casco. Neste trabalho, o autor classifica a formação do colchão de ar em quatro configurações distintas, conforme ilustrado na Figura 6. Na Figura 6, o degrau representa o início da cavidade, onde o ar é injetado, e a parede horizontal equivale ao fundo do casco. Na configuração 1 ocorre uma rápida reentrância da água ao final da camada de ar, na qual são observadas a geração de vórtices e a ocorrência de vazamentos de ar, o que resulta na instabilidade do colchão de ar formado. A configuração 2 caracteriza-se por um comportamento estável do colchão de ar, na qual se observa um recolamento suave do escoamento à parede. Na configuração 3, o escoamento recola de forma abrupta na parede horizontal, sendo caracterizado por componentes de velocidade intensas na região de recolamento. Tal comportamento resulta no aumento da resistência ao avanço. Cabe ressaltar o maior consumo de ar para a formação do colchão sob a parede nesta configuração. Por último, na configuração 4 não ocorre o recolamento do escoamento à parede e o vazamento de ar é significativo e descontrolado. Esta configuração resulta em uma extensão grande, o que vantajoso em termos da redução do arrasto. Todavia, mantê-la exige enormes vazões de ar.

4.2 GEOMETRIA DO CASCO: ORIGINAL E COM CAVIDADE

Considerando-se as características operacionais do casco OXÚM e a opção pelo método de injeção natural de ar, pretende-se alcançar a configuração 2 para a formação do colchão de ar sob o casco. Neste sentido foram implementadas duas geometrias para a cavidade sob o casco: com e sem fechamento no espelho de popa.

O modelo computacional do casco é formado por quatro superfícies, a saber: costado, fundo, espelho de popa e convés. Conforme já comentado, em função da adoção da hipótese de simetria do escoamento, apenas um dos bordos do casco foi incorporado ao modelo computacional. As Figuras 7, 8 e 9 ilustram o modelo computacional do casco original.

A instalação de um sistema de injeção de ar no casco requer, além da configuração de uma cavidade na região do fundo, a localização de pontos de captação de ar, bem como sua ligação à cavidade. Em função do arranjo das placas fotovoltaicas no convés da embarcação (vide Figura 4), optou-se pela instalação das entradas de ar nos costados da embarcação, em uma posição longitudinal alinhada com a face de vante da primeira placa fotovoltaica. A entrada de ar possui um bocal de formato semi-cilíndrico, com 5,0 cm de raio. O bocal de entrada é conectado à região de vante da cavidade através de uma tubulação de mesmo formato e raio, tal como ilustrado nas Figuras 10 e 11.

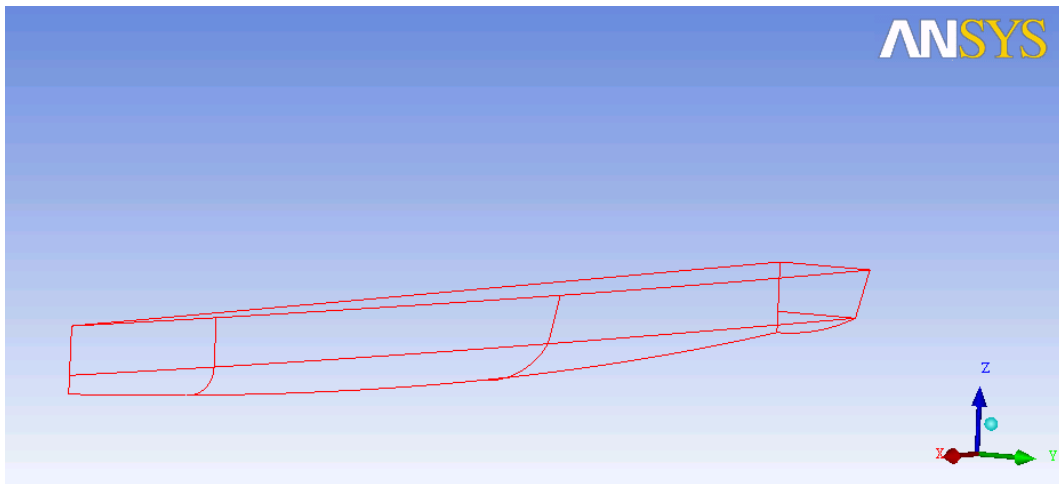


Figura 7: Linhas principais da geometria original do casco.

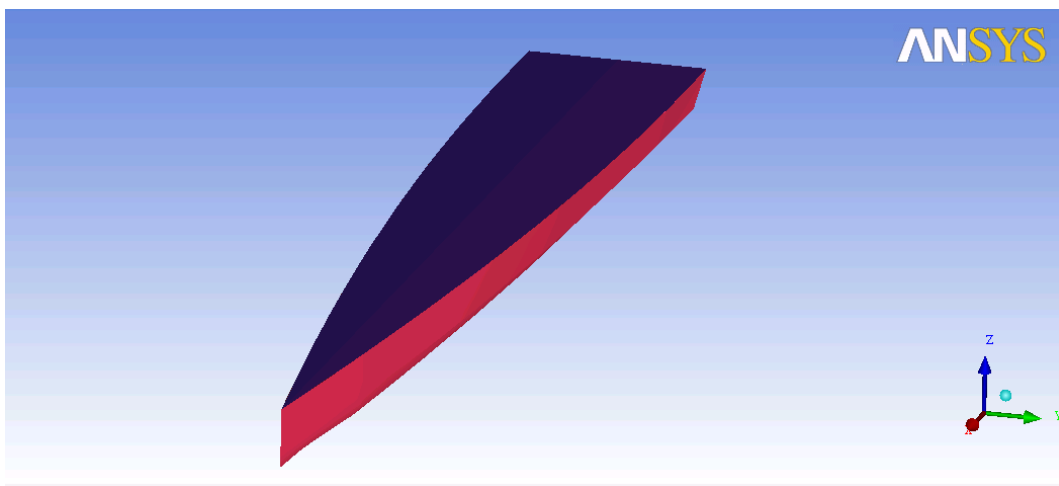


Figura 8: Vista superior da geometria original do casco.

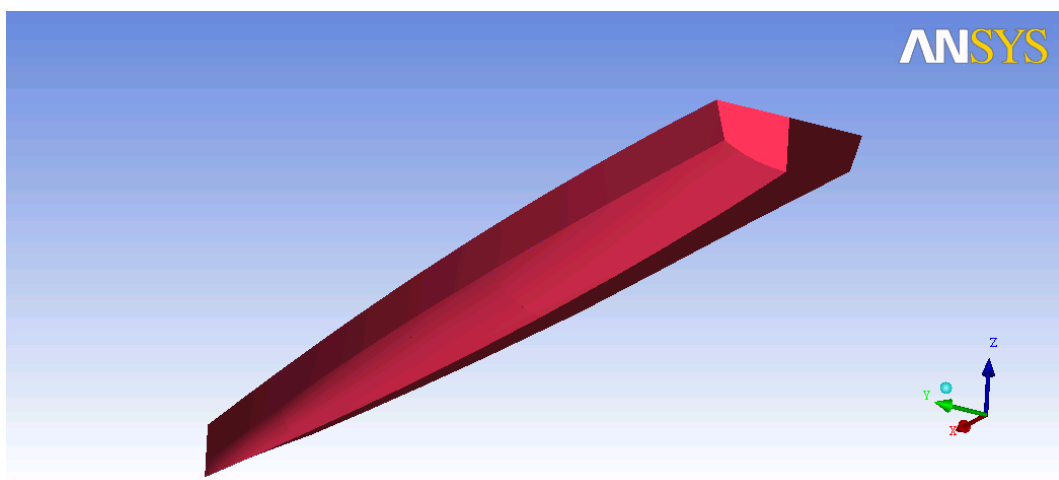


Figura 9: Vista inferior da geometria original do casco.

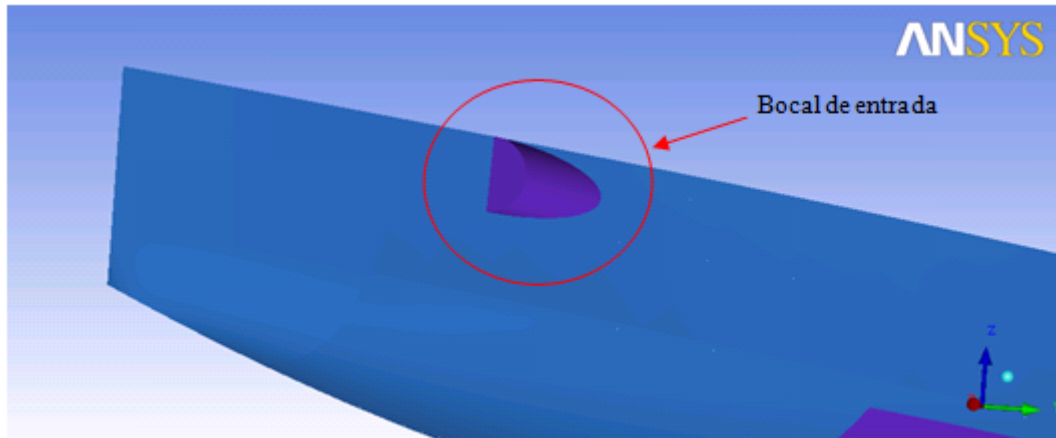


Figura 10: Detalhe do bocal de entrada de ar no costado.

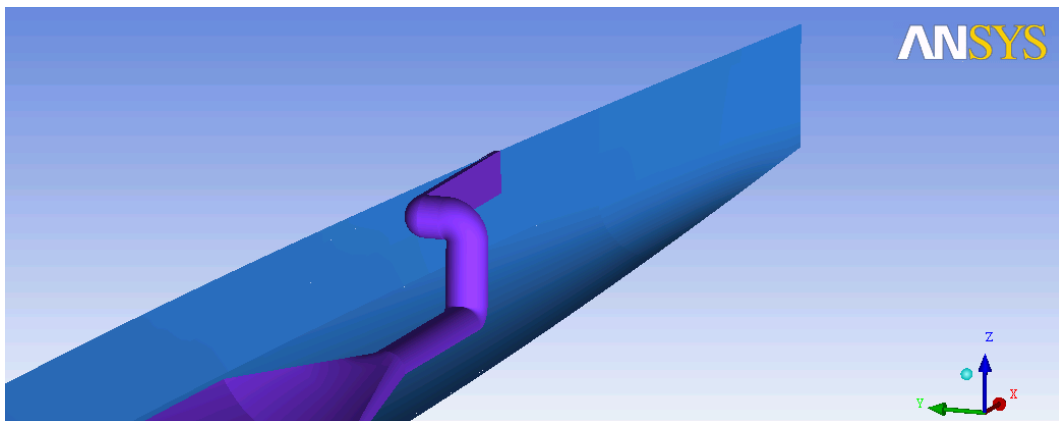


Figura 11: Detalhe do duto de ligação do bocal de entrada de ar à cavidade.

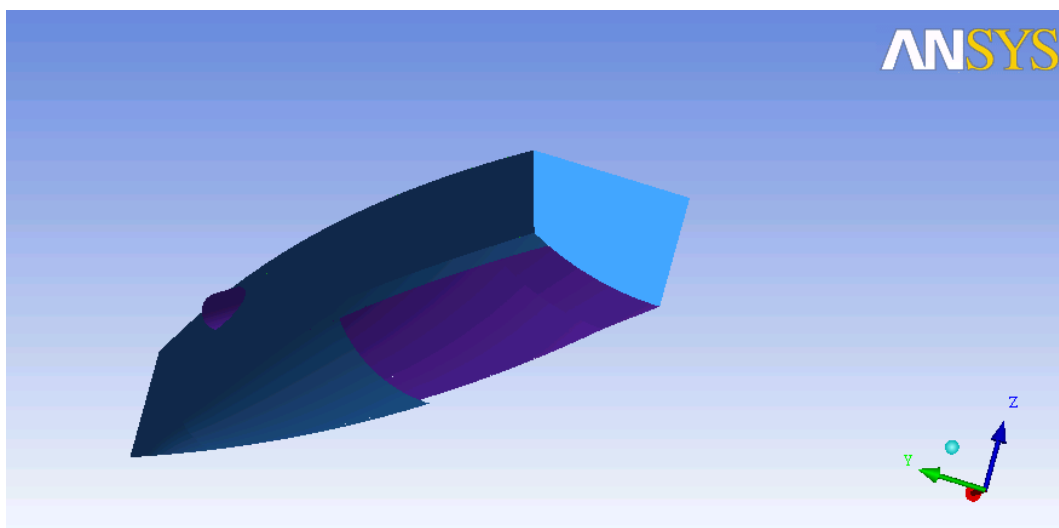


Figura 12: Configuração de saída da cavidade: com fechamento.

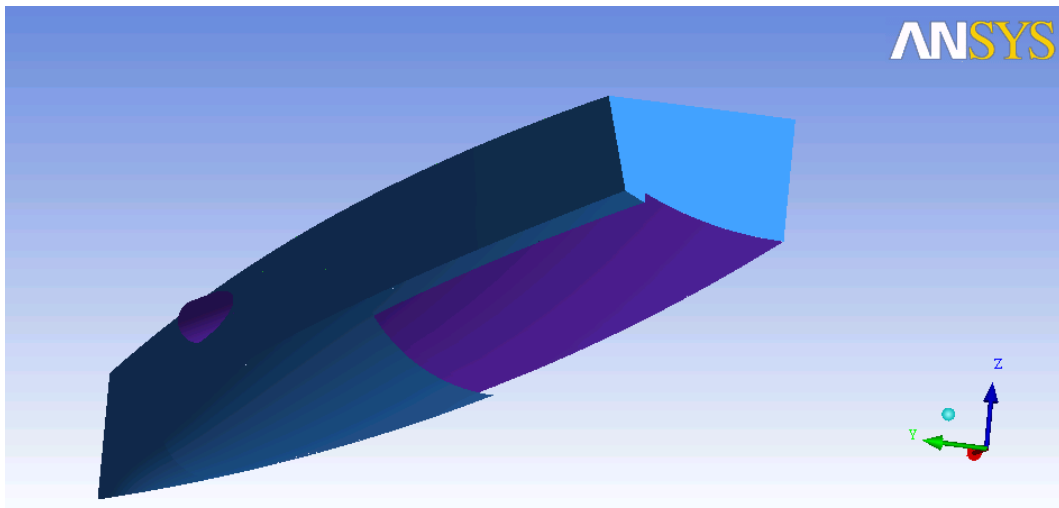


Figura 13: Configuração de saída da cavidade: sem fechamento.

Conforme comentado, a configuração selecionada para a cavidade (configuração 2) requer uma grande extensão, de modo a permitir o recolamento suave do escoamento ao fundo do casco. Assim sendo, definiu-se a maior extensão possível sob o casco para a cavidade, a qual se estende desde o ponto de menor pressão dinâmica sob o casco, localizado a 40% do comprimento de linha d'água, até o espelho de popa. Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as configurações de saída adotadas para a cavidade: com e sem fechamento.

5. MODELO NUMÉRICO

O desempenho hidrodinâmico da efetividade da injeção de ar foi avaliado através de um modelo numérico específico para a simulação do escoamento ao redor de cascos de embarcações. O pacote comercial ANSYS CFX, versão 14.0, foi utilizado para o desenvolvimento do modelo numérico. O modelo matemático adotado pelo código ANSYS CFX é baseado na solução implícita das equações RANS, discretizadas pelo método dos volumes finitos em todo o domínio fluido.

No presente estudo, o modelo de turbulência κ - ε foi adotado para a predição do campo de propriedades turbulentas, tendo sido desenvolvida uma discretização de malha suficientemente refinada de modo a permitir uma adequada descrição do escoamento ao redor da superfície livre. O modelo VOF (Volume of Fluid) foi adotado para a discretização da campo de escoamento próximo à superfície livre. Em vista das características de esbeltos do casco e da manutenção de uma condição de equilíbrio constante, as soluções obtidas restringiram-se apenas a condições de escoamento em regime permanente.

5.1 GERAÇÃO DO DOMÍNIO FLUIDO E DA MALHA COMPUTACIONAL

O domínio fluido é formado por sete superfícies, a saber:

- ❑ Inlet – Superfície onde são aplicadas as condições de contorno de entrada do fluido. Na Figura 14 ela está representada pela cor azul.
- ❑ Outlet – Superfície onde são aplicadas as condições de contorno de saída do fluido. Na Figura 14 ela está representada pela cor amarela.
- ❑ Bottom – Superfície onde são aplicadas as condições de contorno do fundo, representando o fundo do rio no qual a embarcação navega. Na Figura 14 ela está representada pela cor marrom.
- ❑ Top – Superfície onde são aplicadas as condições de contorno do topo do domínio, por onde o ar pode circular livremente. Na Figura 14 ela está representada pela cor verde mais escura.
- ❑ Sym – Superfície onde são aplicadas as condições de contorno de simetria. Na figura 14 ela está invisível para melhor visualização das outras superfícies que formam o domínio.
- ❑ Side- Superfície onde são aplicadas as condições de contorno do lado do domínio. Na Figura 14 ela está representada pela cor roxa.
- ❑ Free_Surf – Superfície auxiliar para a configuração da malha ao redor da superfície livre. Na Figura 14 ela está representada pela cor verde.

Nas Figuras 15 e 16 é possível visualizar as dimensões do domínio fluido, cujos valores foram definidos de modo a garantir sua independência em relação aos resultados. Como pode ser visto na Figura 15 o domínio fluido possui uma seção transversal quadrada com 4,0 m de lado (altura e largura). O comprimento do domínio fluido foi estabelecido tendo como referência o comprimento do casco, perfazendo um valor total equivalente a 5,0 comprimentos totais.

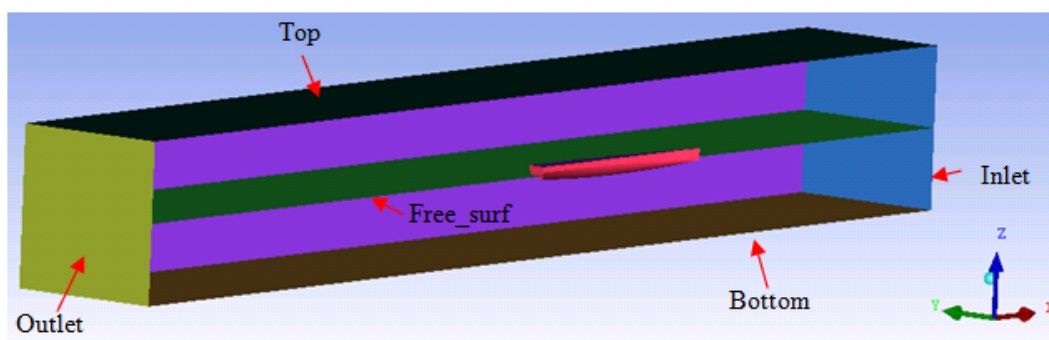


Figura 14: Vista isométrica do domínio fluido.

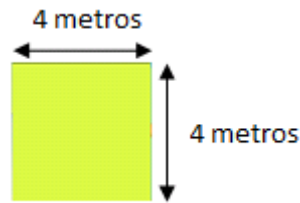


Figura 15: Vista transversal e dimensões do domínio fluido.

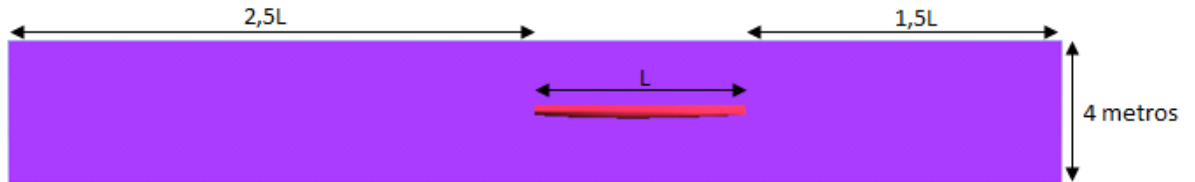


Figura 16: Vista lateral e dimensões do domínio fluido.

O domínio fluido foi discretizado através de uma malha computacional do tipo não-estruturada, composta, em sua maioria, por elementos tetraédricos e prismáticos. A opção pela discretização do domínio fluido por meio de uma malha não-estruturada teve por base a maior simplicidade tanto para o seu desenvolvimento quanto para sua configuração. Cabe ressaltar que a região ao redor da superfície livre foi discretizada através de elementos prismáticos de modo a garantir uma melhor representação da interface ar-água.

Nas superfícies do casco e do convés, a malha computacional apresenta um nível maior de refinamento, de modo a garantir uma melhor descrição das características do escoamento ao seu redor. Os elementos de malha que formam essas superfícies têm um tamanho máximo de 125 mm. Além disso, a razão de variação de tamanho em relação aos elementos que circundam o casco e o convés é de 1,2, fazendo com que o campo de escoamento próximo à embarcação também seja devidamente refinado.

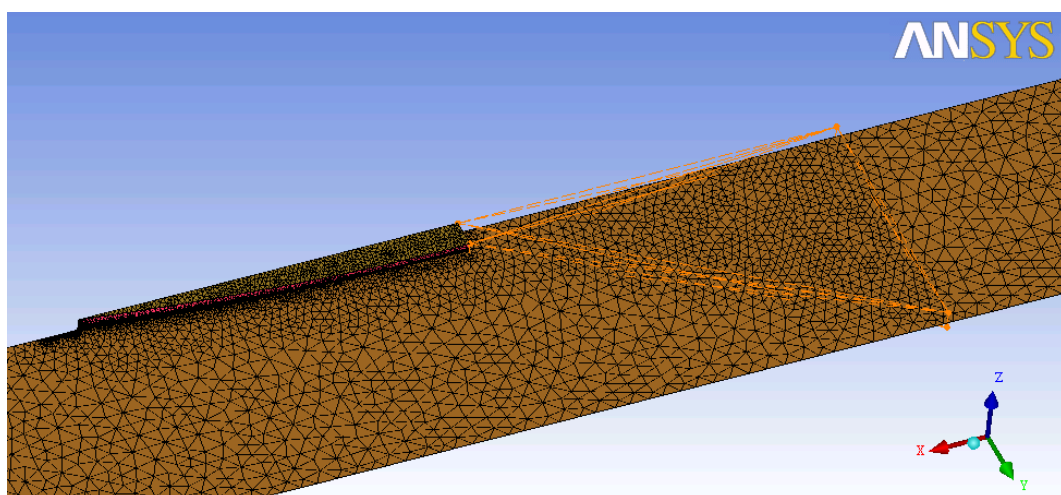


Figura 17: Densidade da malha computacional na região da esteira.

A ré do casco foi criada uma região de maior refinamento dos elementos da malha de modo a garantir uma melhor descrição das propriedades do escoamento na região da esteira.

O tamanho máximo dos elementos dessa densidade é de 250 mm. Esta pode ser vista na Figura 17 através das linhas laranja pontilhadas.

Além disso, um maior refinamento da malha foi aplicado a região logo a vante da proa, onde é observado um intenso gradiente de pressão. A fim de melhor capturar a intensidade do gradiente de pressão, foi adotado um tamanho máximo de 20 mm para os elementos da malha nessa região (Figura 18).

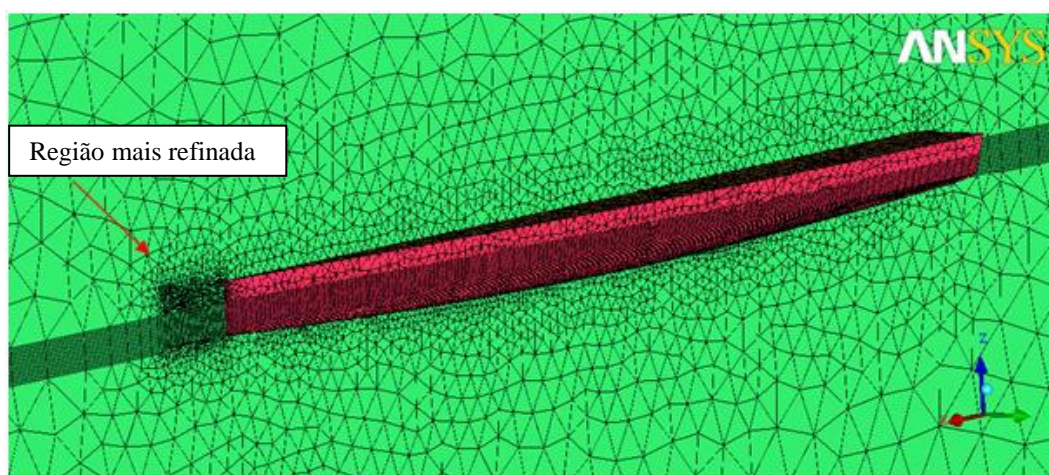


Figura 18: Ilustração do refinamento da malha na região da proa.

Na Figura 18 também podem ser observadas as camadas de elementos prismáticos inseridos, como dito anteriormente, para representar melhor a superfície livre. Na Tabela 3 são mostradas as propriedades dessas camadas de elementos.

Tabela 3: Propriedades das camadas de elementos prismáticos.

Número de camadas	10
Altura Total	100 mm
Altura de cada camada	10 mm

Na malha do casco com injeção de ar, foram inseridos elementos mais refinados no bocal de entrada, tubulação e cavidade para capturar as mudanças ocorridas nas propriedades do escoamento. O tamanho máximo desses elementos será de 20 mm. As Figuras 19 e 20 ilustram o refinamento da malha nessas regiões.

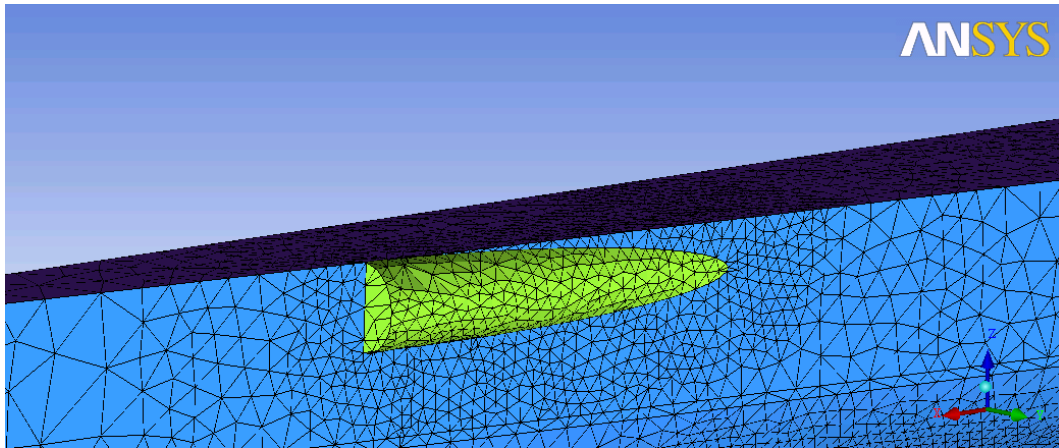


Figura 19: Malha do bocal de entrada de ar.

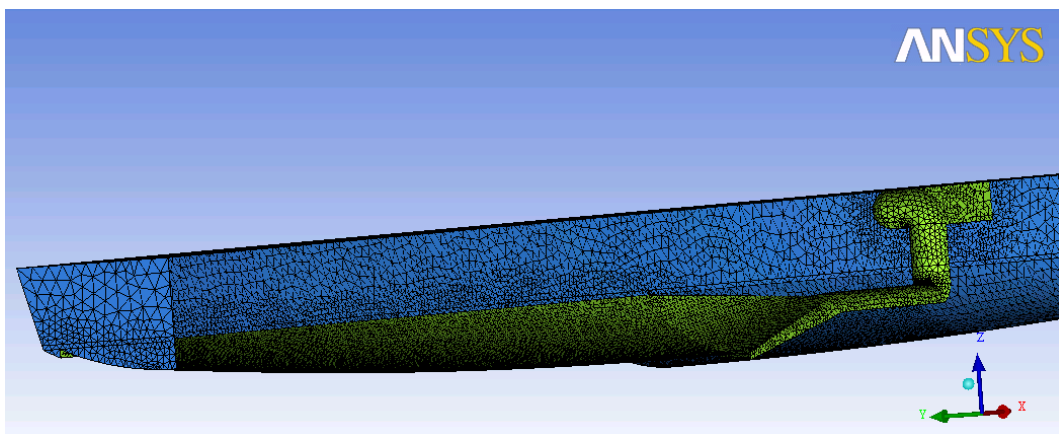


Figura 20: Malha da entrada de ar e da cavidade vistas de um corte longitudinal feito na linha de centro do casco.

5.2 CONFIGURAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Em cada uma das superfícies do domínio foram inseridas condições de contorno que representassem as características do escoamento naquele local.

A condição de entrada (inlet) do escoamento foi inserida na superfície “inlet” e está representada pela seta preta na Figura 21. A velocidade axial de entrada do escoamento é colocada como a velocidade de avanço do casco em cada um dos casos (8, 10 e 12 nós).

Já na superfície do fundo (bottom) foi inserida a condição de parede não-eskorregamento para representar o fundo do rio no qual a embarcação navega. No casco (hull) foi inserida a mesma condição, indicando que nesses locais a velocidade do escoamento é nula.

Nas superfícies “outlet”, “side” e “top”, para representar a saída do escoamento, foi colocada a condição “opening”, indicando que o escoamento neste pode ocorrer em ambos os sentidos: tanto para dentro quanto para fora do domínio fluido. O perfil de pressão nessas superfícies é calculada pela equação:

$$\rho g(\text{waterlevel} - z) * VFWater \quad (3)$$

em que, ρ é a massa específica da água, g é a gravidade, water level é o nível da superfície livre, z é a altura de referência (0, no caso) e VFWater é a fração volumétrica da água.

Finalmente, na superfície “sym” foi inserida a condição “symmetry”, indicando imposição da condição de simetria do escoamento em relação ao plano ZX localizado na linha de centro do casco. A superfície “sym” está representada pelas setas vermelhas na Figura 21.

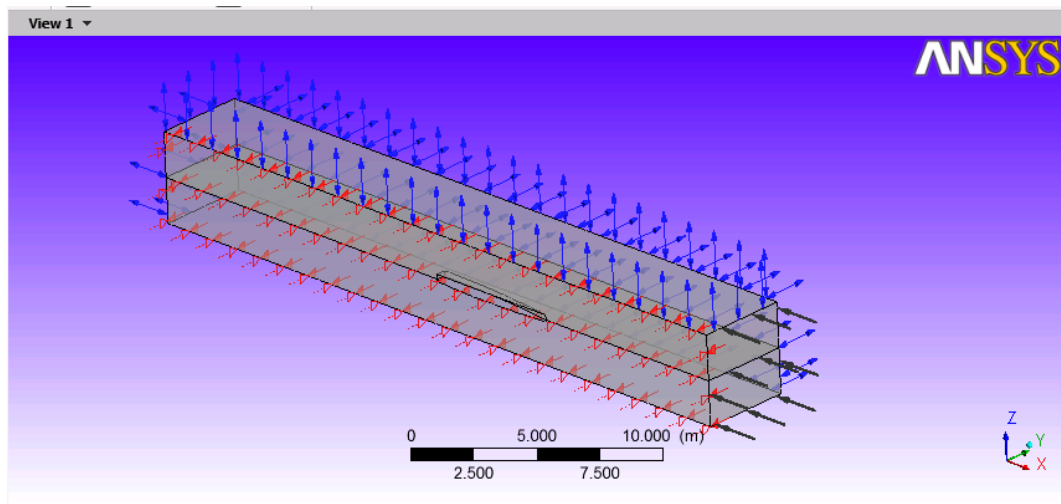


Figura 21: Condições de contorno.

A Tabela 4 a seguir resume as configurações do modelo numérico implantadas para a realização das análises.

Tabela 4: Configurações do modelo numérico.

Regime de escoamento	Permanente
Modelo de Turbulência	k- ϵ
Número de iterações	500
Passo de tempo	0,05s

5.3 VERIFICAÇÃO DA INDEPENDÊNCIA DA MALHA COMPUTACIONAL

O teste de independência da malha é feito para verificar sua influência nos resultados das simulações. Isso é feito para garantir que os resultados encontrados não dependem da malha e que seu nível de refinamento é suficiente para uma adequada representação dos fenômenos físicos envolvidos.

A verificação da independência da malha foi realizada tendo como referência três parâmetros de comparação:

- Altura da linha d'água na linha de centro
- Altura da linha d'água ao redor do casco
- Resistência ao avanço

Depois de criada a malha com os parâmetros já vistos no capítulo 5.1, foram geradas outras duas malhas através do escalonamento global do tamanho dos elementos. Uma delas com escala global de 0,9 e a outra de 0,8.

Depois de ter analisado as três malhas, com os resultados obtidos, foram plotados dois gráficos para fazer a comparação dos dois primeiros parâmetros, como pode ser visto nas Figuras 22 e 23.

No gráfico da figura 22, foi inserido um trapézio azul representando a localização do casco, onde o escoamento contorna a embarcação e não informações sobre a altura da superfície livre na linha de centro. Contudo suas dimensões não são as reais, pois a escala e os limites do gráfico não permitiriam a completa visualização dele.

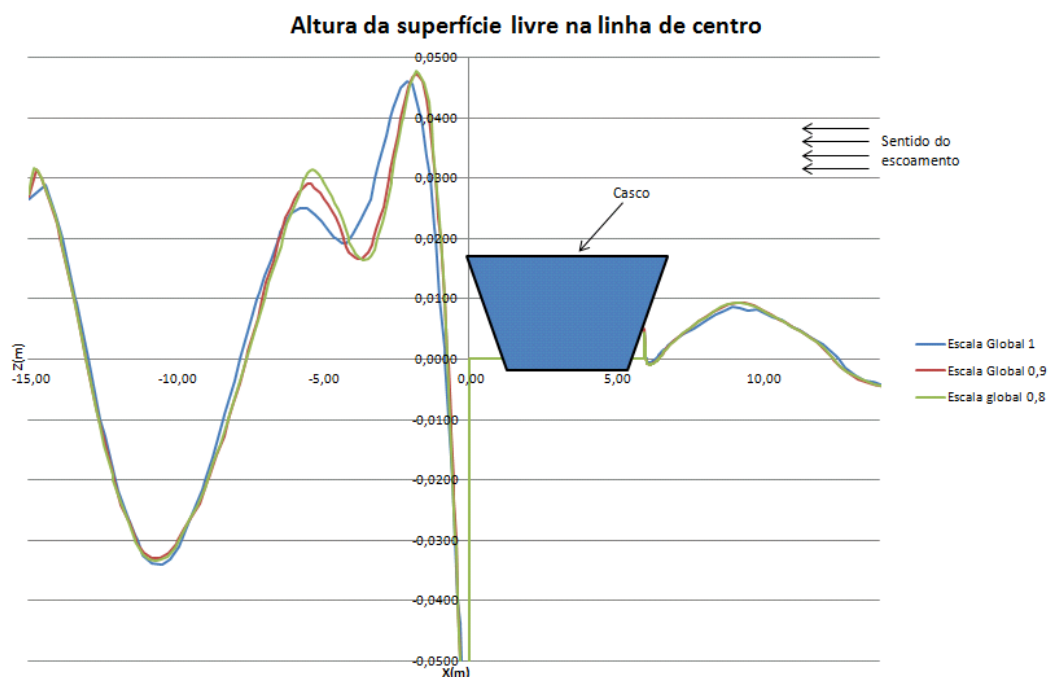


Figura 12: Gráfico de comparação entre malhas – Altura da Superfície Livre na linha de centro.

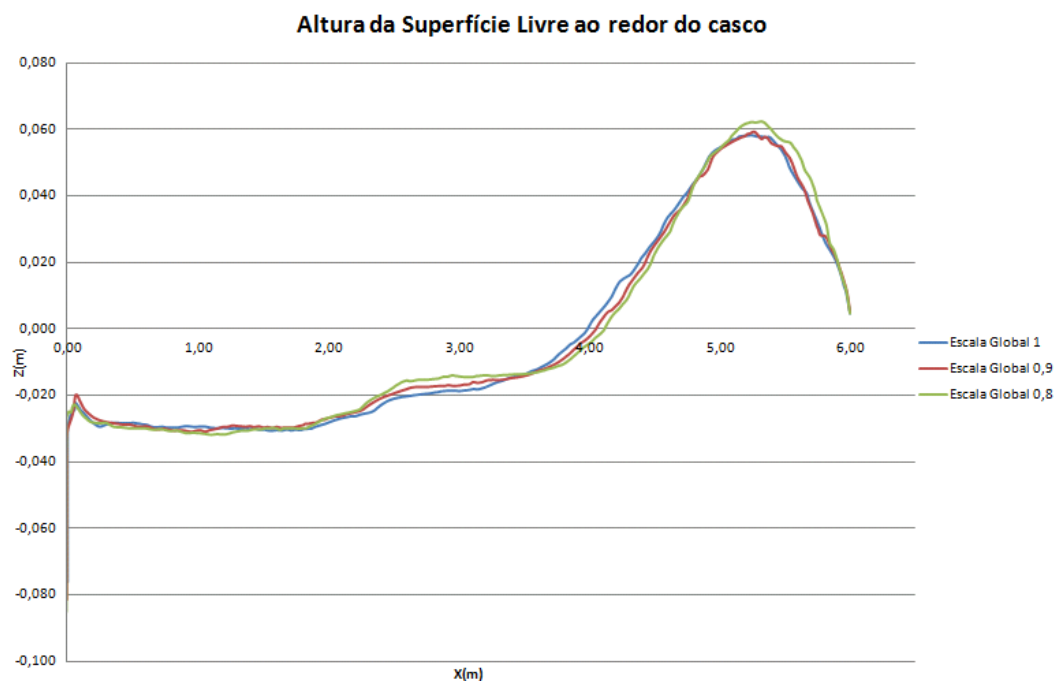


Figura 23: Gráfico de comparação entre malhas - Altura da Superfície Livre ao redor do casco.

Para a comparação do terceiro parâmetro foi criada a Tabela 4.

Tabela 4: Comparação entre malhas - Resistência ao avanço no casco.

Escala	Valor de Resistência ao Avanço	Diferença
Escala Global 1,0	134,67 N	-
Escala Global 0,9	134,90 N	0,17%
Escala Global 0,8	134,43 N	-0,18%

As diferenças encontradas entre as três malhas são pequenas, sendo assim, foi escolhida a malha de escala global 0,9. Isso porque na análise da altura de superfície livre no centro do casco a malha de escala global 1, destoou um pouco mais das outras duas.

As quantidades de elementos de cada malha podem ser vista na Tabela 5:

Tabela 5: Quantidade de elementos de cada malha.

Escala	Número de Elementos
Escala Global 1,0	447.135
Escala Global 0,9	606.966
Escala Global 0,8	755.182

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados de cada um dos casos analisados para 8, 10 e 12 nós.

6.1 CASCO ORIGINAL

O sistema de ondas gerado pelo casco original pode ser visto nas Figuras 24, 25 e 26. Nota-se que há um aumento no comprimento das ondas geradas pelo casco com o acréscimo na velocidade. Percebe-se também que o cavado é gerado cada vez mais a ré do casco.

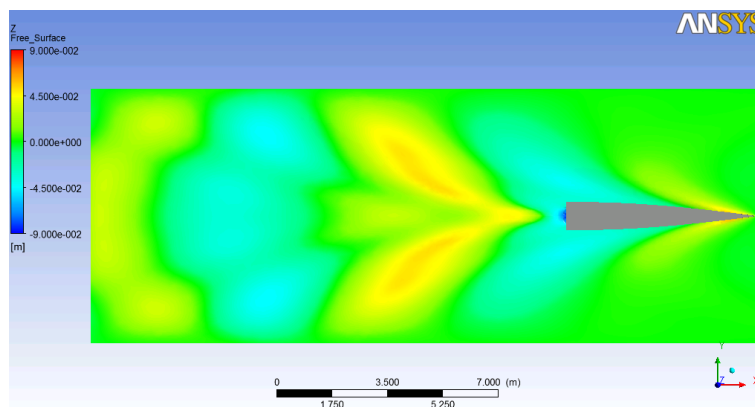


Figura 24: Sistema de ondas gerado pelo casco – 8 nós.

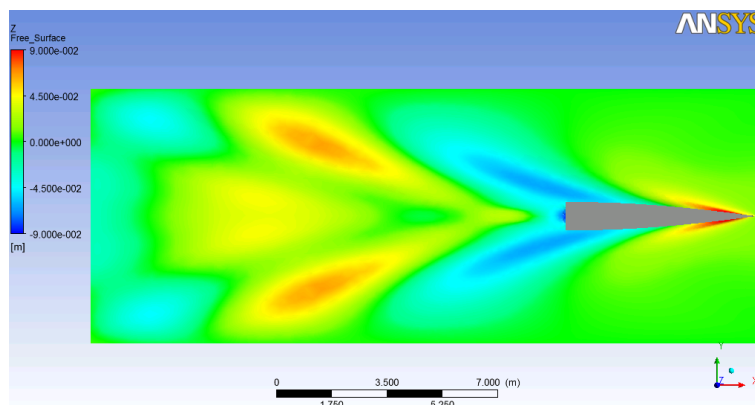


Figura 25: Sistema de ondas gerado pelo casco – 10 nós.

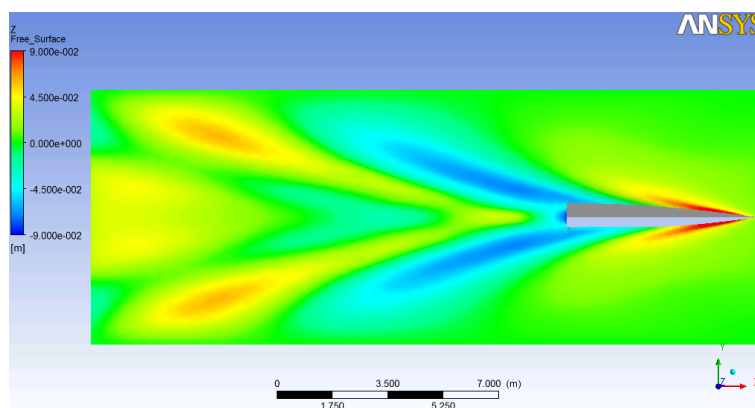


Figura 26: Sistema de ondas gerado pelo casco – 12 nós.

Ademais, a crista da onda gerada na proa do casco é cada vez maior e o cavado cada vez mais a ré profundo, como pode ser melhor observado nas Figuras 27, 28 e 29 (Crista da onda na proa) e nas Figuras 30, 31 e 32 (Cavado da onda a ré).

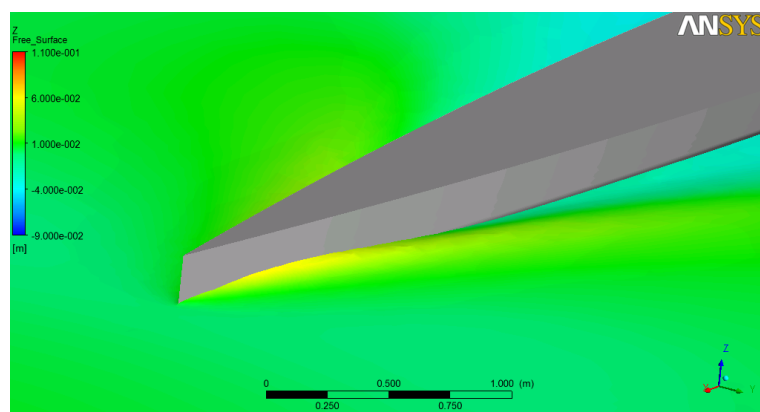


Figura 27: Crista da onda gerada na proa do casco – 8 nós.

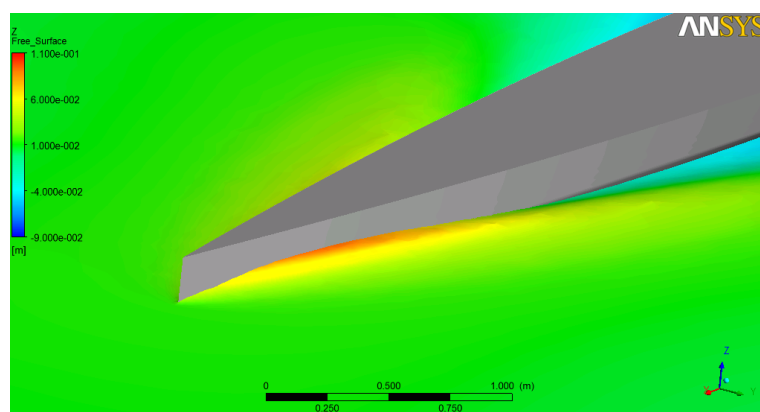


Figura 28: Crista da onda gerada na proa do casco – 10 nós.

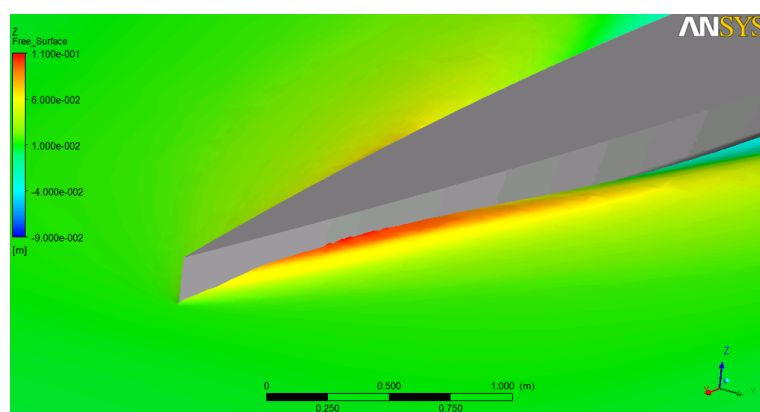


Figura 29: Crista da onda gerada na proa do casco – 12 nós.

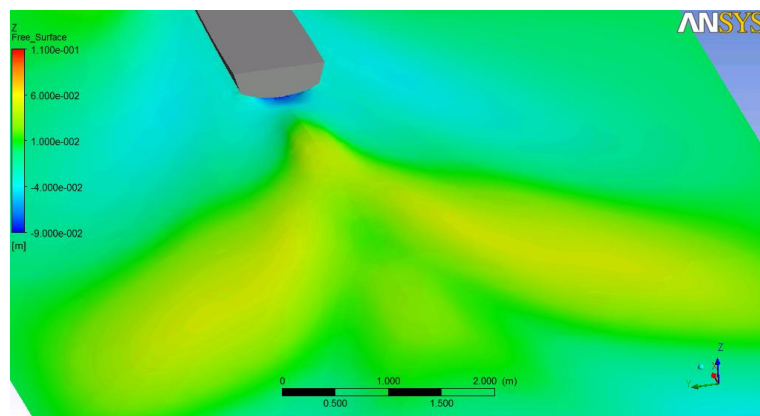


Figura 30: Cavado a ré do casco – 8 nós.

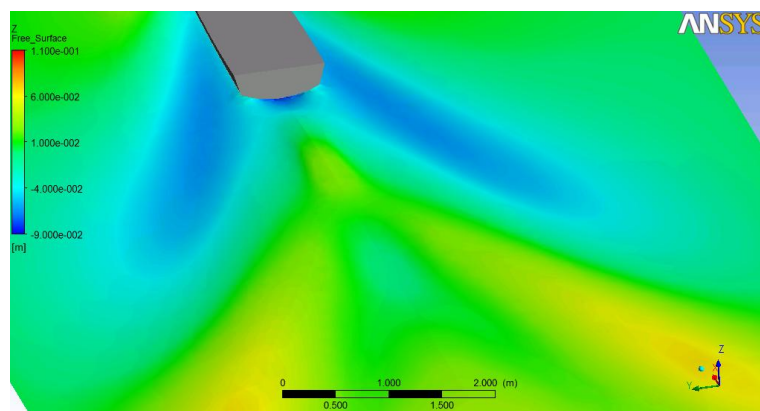


Figura 31: Cavado a ré do casco – 10 nós.

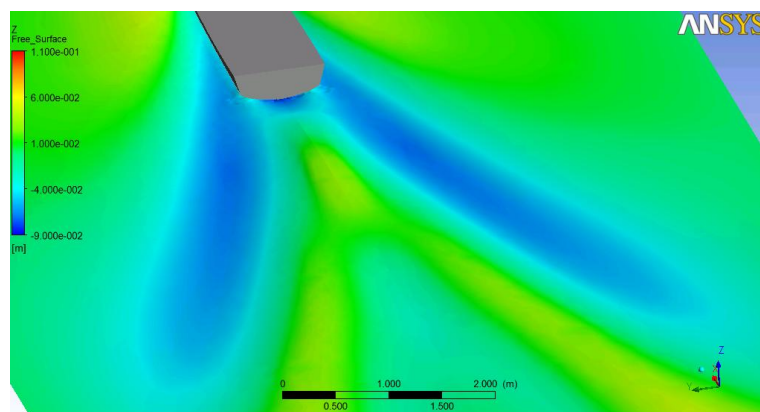


Figura 32: Cavado a ré do casco – 12 nós.

Nas Figuras 33, 34 e 35 é possível visualizar o perfil de ondas ao redor do casco. Mais uma vez verifica-se o aumento da crista da onda gerada na proa.

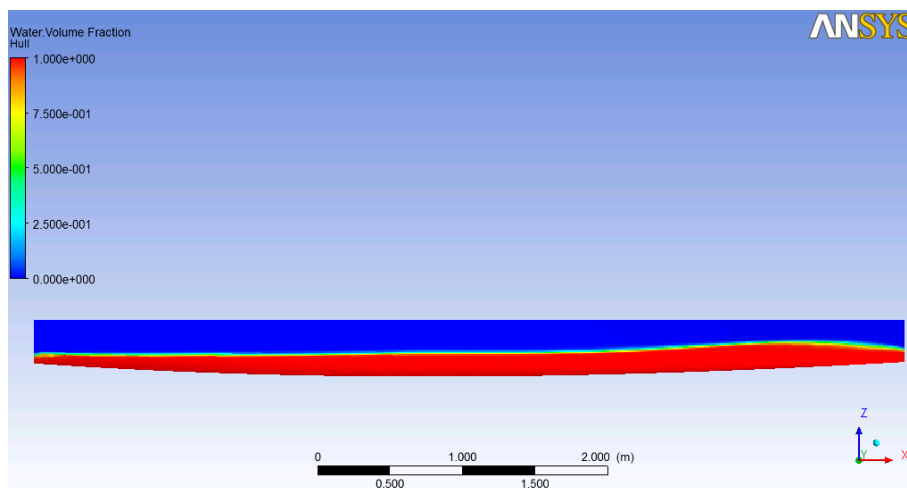


Figura 33: Perfil de onda ao redor do casco – 8 nós

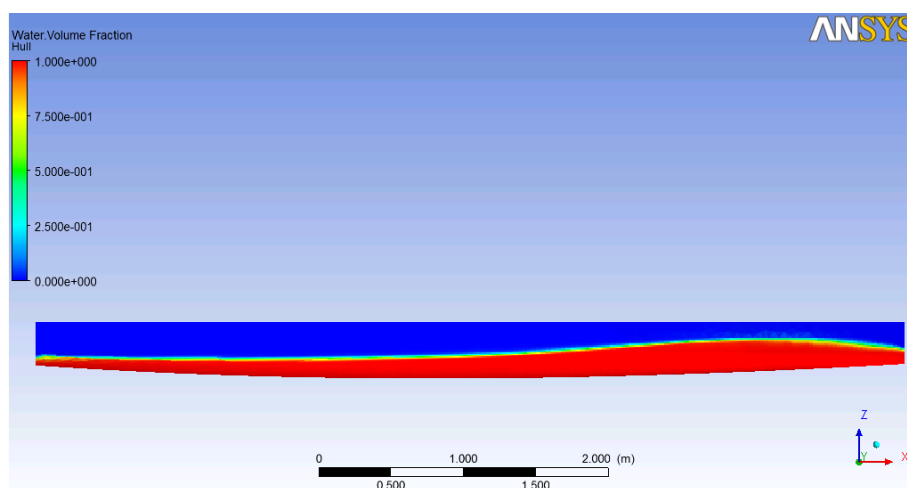


Figura 14: Perfil de onda ao redor do casco – 10 nós

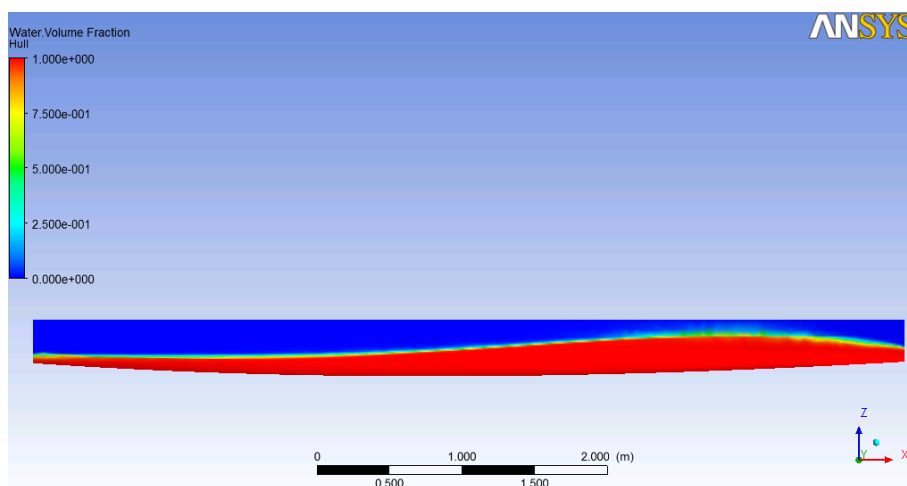


Figura 35: Perfil de onda ao redor do casco – 12 nós

6.2 CASCO COM CAVIDADE E SEM FECHAMENTO NA POPA

As Figuras 36, 37 e 38 mostram o sistema de ondas gerado pelo casco para o caso do casco com cavidade, sem fechamento na popa e com o calado original de 18 cm. Percebe-se que apesar da introdução da cavidade não levar a grandes mudanças nas ondas geradas pelo casco, o cavado a ré é ligeiramente mais profundo.

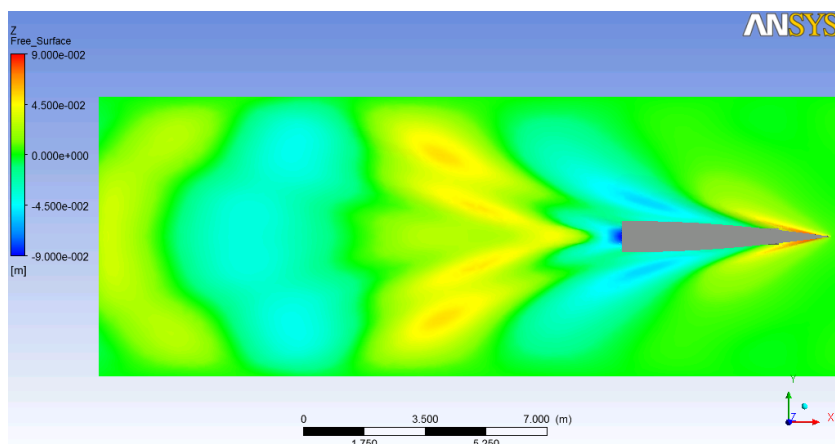


Figura 36 – Sistema de ondas gerado pelo casco com cavidade, sem fechamento na popa e calado de 18 cm - 8 nós

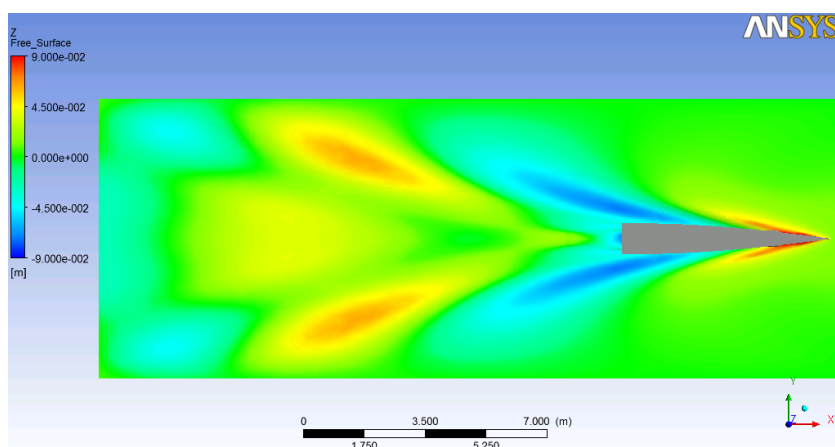


Figura 37 – Sistema de ondas gerado pelo casco com cavidade, sem fechamento na popa e calado de 18 cm - 10 nós

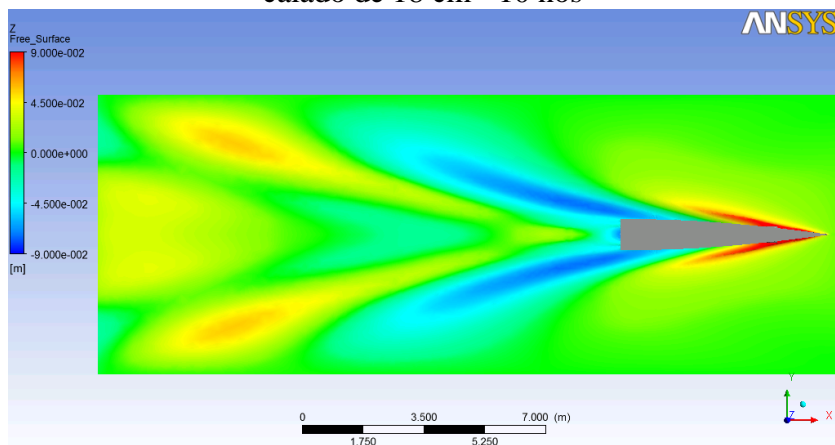


Figura 38 – Sistema de ondas gerado pelo casco com cavidade, sem fechamento na popa e calado de 18 cm - 12 nós

As Figuras 39, 40 e 41 mostram a região da proa da embarcação. Deve-se atentar que quanto maior a velocidade maior é a crista da onda gerada nessa região, como já foi dito anteriormente. Percebe-se que para as velocidades maiores que 12 nós a onda gerada possivelmente alcançaria o bocal, havendo a possibilidade de entrada de água pela tubulação.

As Figuras 42, 43 e 44 ilustram a formação do colchão de ar sob o casco para as diferentes velocidades analisadas. A cor vermelha representa a água e a azul o ar, enquanto a mistura é representada pelas cores mostradas na escala.

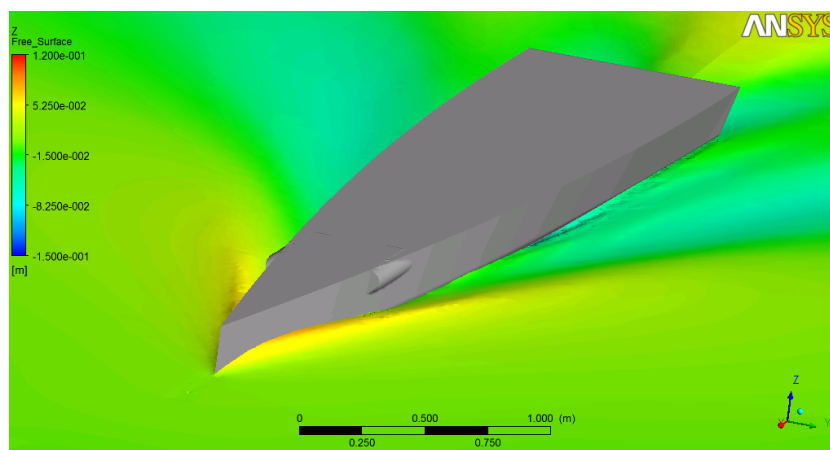


Figura 39 – Detalhe da onda formada na região da proa - 8 nós

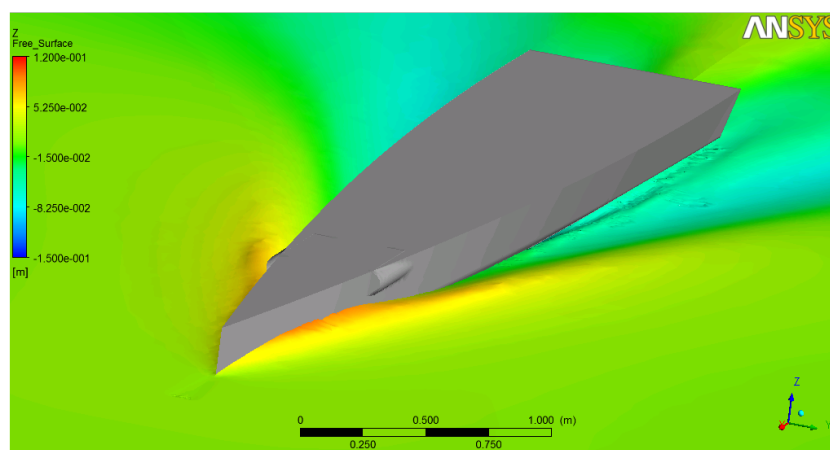


Figura 40 – Detalhe da onda formada na região da proa - 10 nós

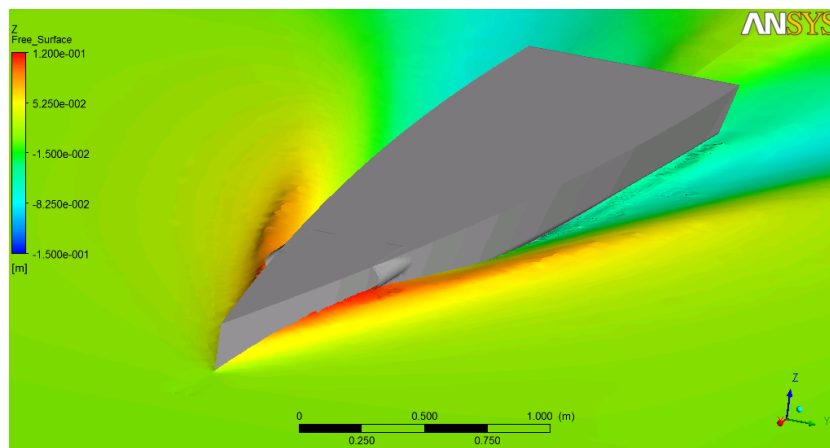


Figura 41 – Detalhe da onda formada na região da proa - 12 nós

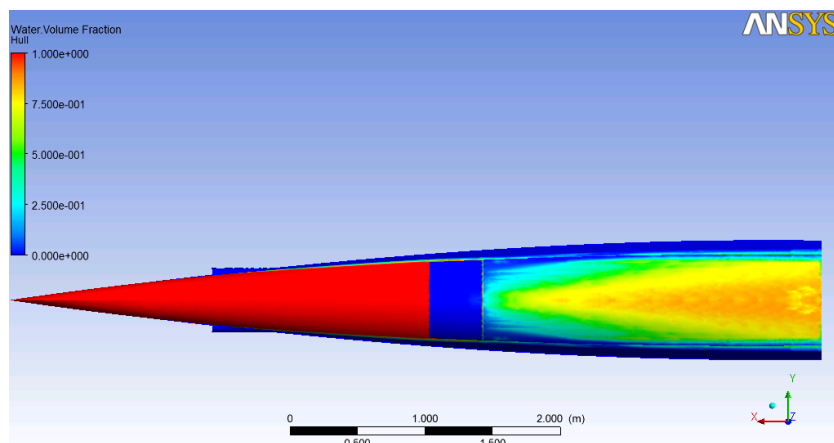


Figura 42 - Camada de ar - 8 nós.

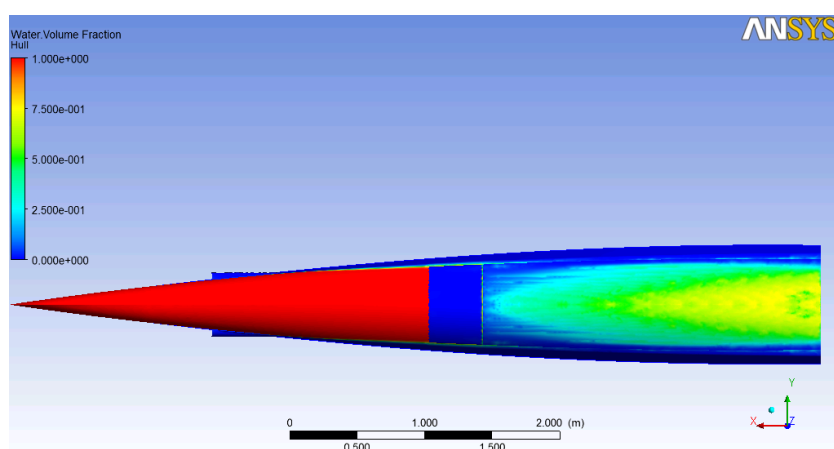


Figura 43 - Camada de ar - 10 nós.

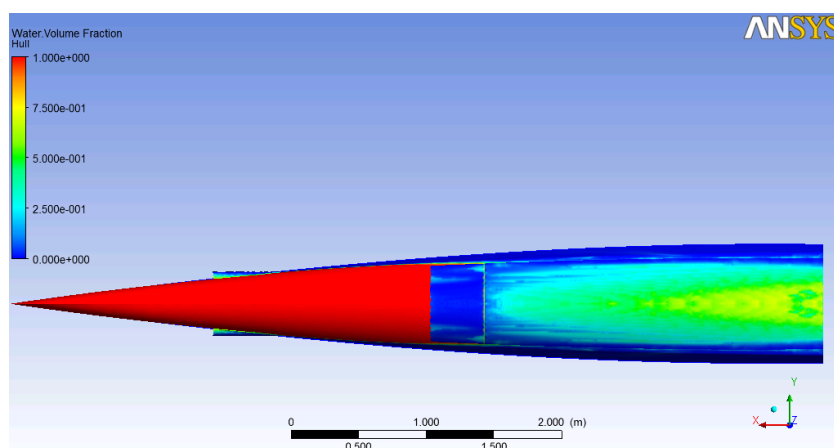


Figura 44 - Camada de ar - 12 nós.

É possível perceber que, como esperado, o aumento da velocidade de 8 para 10 nós leva a uma maior extensão da camada de ar. Esse fato eleva a efetividade da injeção em comparação com o casco sem cavidade. Contudo, de 10 para 12 nós a camada de ar permanece praticamente a mesma, tendo atingido sua máxima extensão.

6.3 CASCO COM CAVIDADE E FECHAMENTO NA POPA

As Figuras 45, 46 e 47 mostram o sistema de ondas gerado pelo casco para o caso do casco com cavidade, com fechamento na popa e com o calado final de 19 cm. Este foi modificado aqui para representar a situação final do casco modificado, em que a perda de volume ocasionada pela criação da cavidade acarreta em um pequeno aumento do calado.

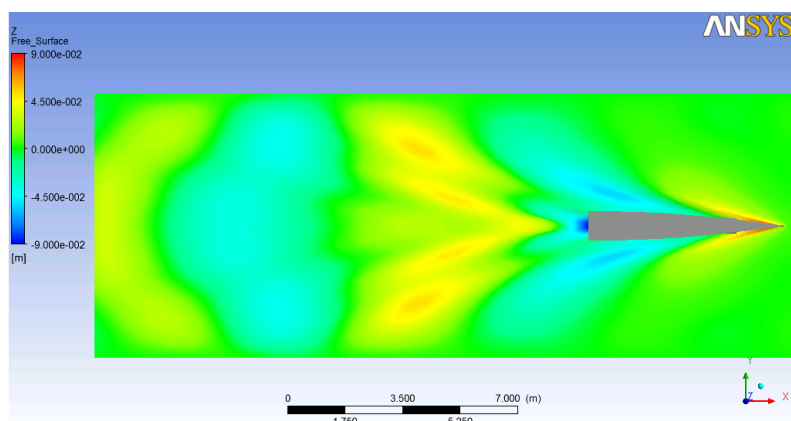


Figura 45 – Sistema de ondas gerado pelo casco com cavidade, com fechamento na popa e calado de 19 cm - 8 nós.

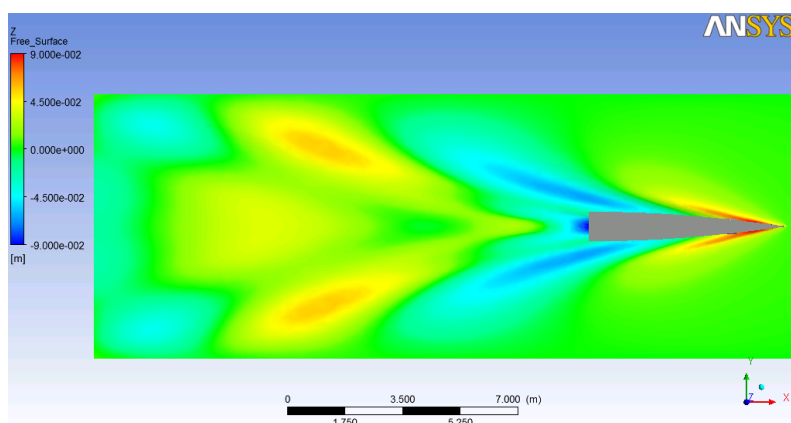


Figura 46 – Sistema de ondas gerado pelo casco com cavidade, com fechamento na popa e calado de 19 cm - 10 nós.

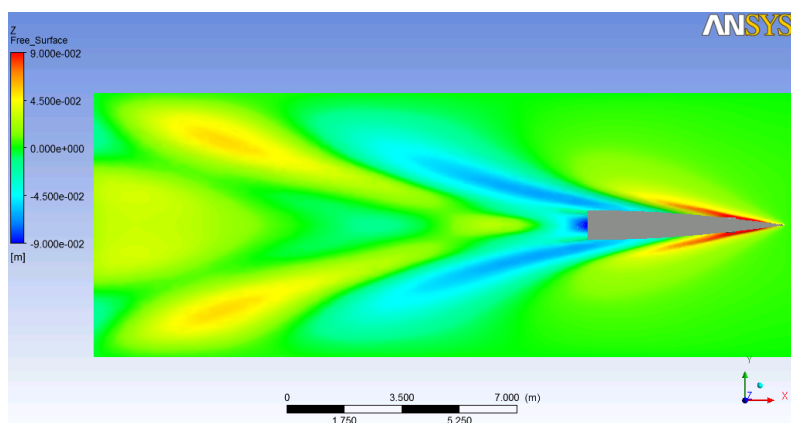


Figura 47 – Sistema de ondas gerado pelo casco com cavidade, com fechamento na popa e calado de 19 cm - 12 nós.

Como pôde ser observado nas Figuras 45, 46 e 47, o fechamento da popa fez com que os cavados das ondas geradas pelo casco se tornassem ligeiramente menos profundos.

A seguir, as Figuras 48, 49 e 50 mostram a camada de ar formada em cada velocidade. É possível perceber que com o fechamento da popa há uma menor quantidade de ar escapando a ré da embarcação.

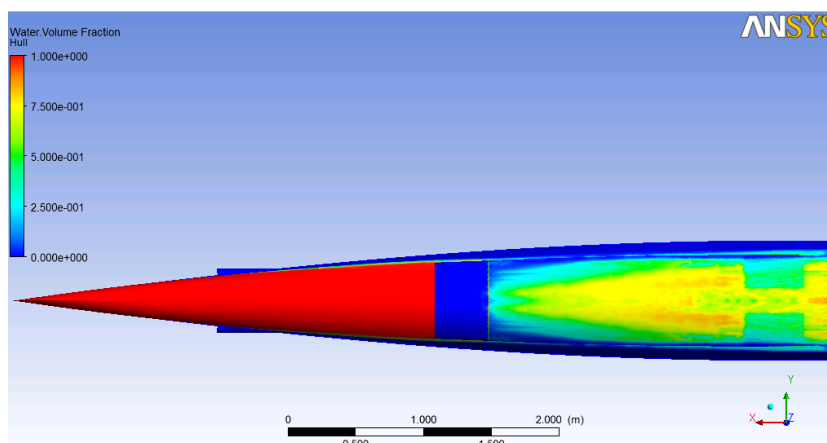


Figura 48 - Camada de ar - 8 nós.

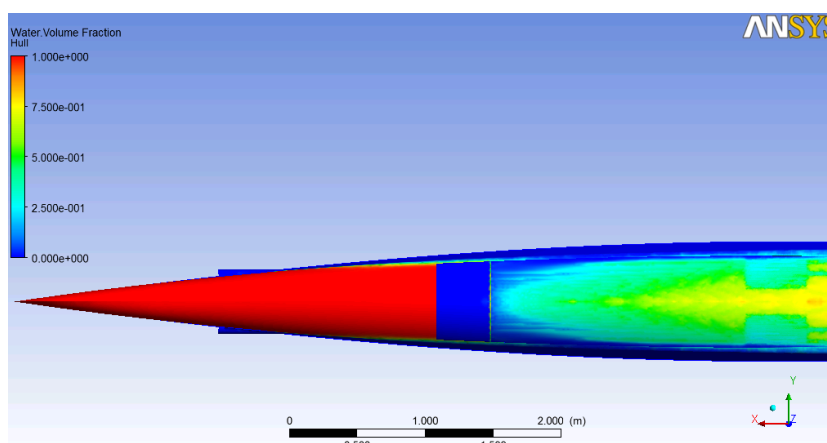


Figura 49 - Camada de ar - 10 nós.

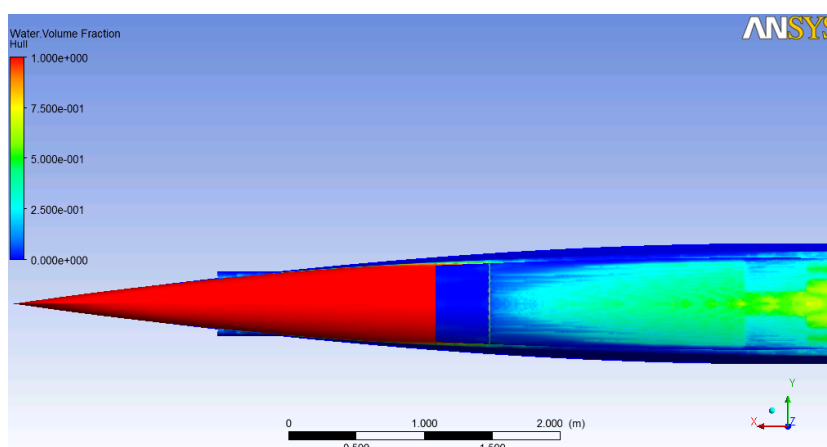


Figura 50 - Camada de ar - 12 nós.

Para finalizar, as Figuras 51, 52 e 53 mostram linha de correntes do escoamento ao redor do casco e da cavidade e também dentro da tubulação.

As linhas de corrente mostram que o aumento da velocidade faz com que logo no início da cavidade a região atingida pelo ar seja mais larga.

Percebe-se também que a tubulação criada para ligar o bocal de entrada a cavidade esta levando a uma grande perda de carga, já que a velocidade do ar está diminuindo de cerca de 4 m/s para aproximadamente 2 m/s.

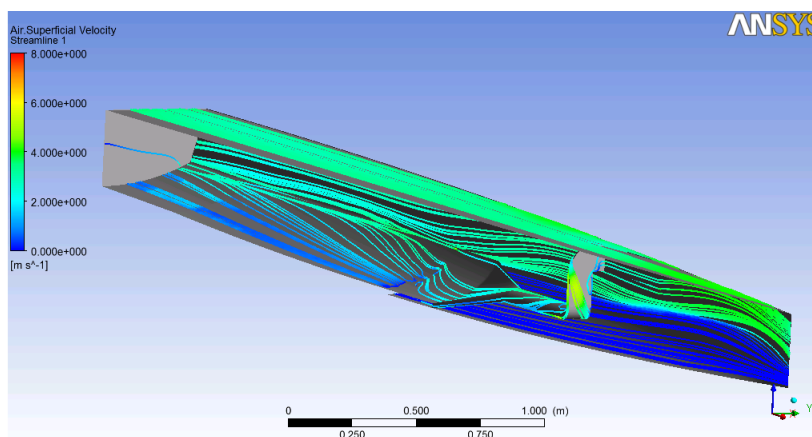


Figura 51 – Linhas de corrente - 8 nós.

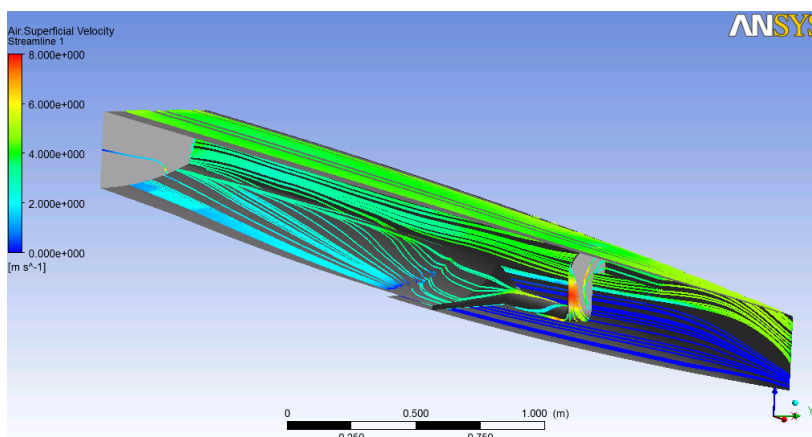


Figura 52 – Linhas de corrente - 10 nós.

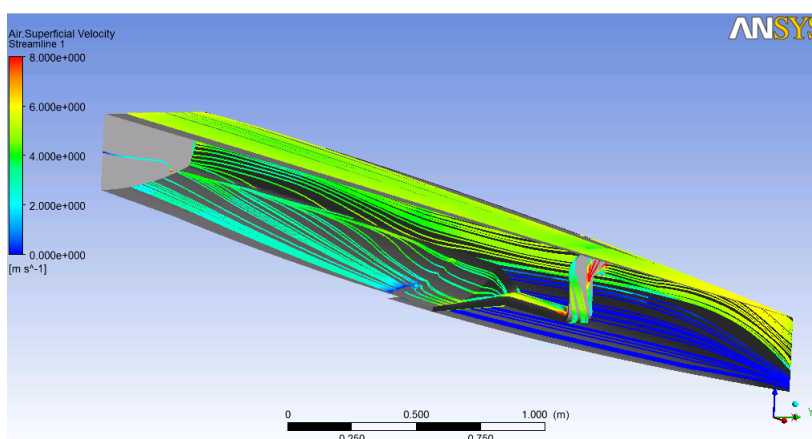


Figura 53 – Linhas de corrente - 12 nós.

A Tabela 6 compara os resultados encontrados para três diferentes cascos em cada uma das três velocidades. A diferença de resistência é em referência aos valores obtidos no casco original.

Tabela 6 – Resumo comparativo dos valores de Resistência ao Avanço.

Casco	Velocidades (Nós)			Efetividade		
	8	10	12	8 nós	10 nós	12 nós
1.Original	134,90	206,28	285,09	-	-	-
2.Com cavidade, sem fechamento na popa e calado 18 cm	117,10	172,08	245,11	13,2%	16,6%	14,0%
3.Com cavidade, fechamento na popa e calado 19 cm	130,33	175,82	230,23	3,4%	14,8%	19,2%

Pela Tabela 6, se pode notar que, para a velocidade de 8 nós, a diferença no decaimento da resistência ao avanço para os dois resultados com cavidade é muito grande. Enquanto para o caso 2 a diferença chega a 13,2% em relação ao casco original, no caso 3 esta é de apenas 3,4%. Isso aconteceu, provavelmente, por causa de dois motivos: O primeiro devido a diferença de calado, causada pela introdução da cavidade no casco. Já o segundo, pelo fechamento na popa, pois para essa velocidade, foi percebido que a camada de ar não chega na região mais a ré do casco e o fechamento acaba prejudicando o resultado.

Já para a velocidade de 10 nós, os resultados obtidos para o caso 2 e 3 foram bastante parecidos. Percebe-se que a efetividade da camada de ar, ou seja, a diferença da resistência ao avanço em relação ao casco original, continua a aumentar (de 13,2% para 16,6% e de 3,4% para 14,8%). Isso porque o aumento na velocidade da embarcação faz com que a camada de ar se torne mais extensa e afete uma área maior do fundo do casco.

Contudo, o aumento na efetividade da camada é muito maior para o caso 3 (3,4% para 14,8%). Uma explicação para essa grande melhora no resultado 3 é que o aumento de resistência causado pela diferença no calado já é superado pela melhoria gerada pela inserção do fechamento na popa. É preciso notar que para essa velocidade a camada de ar já é mais extensa e alcança a região de fechamento da camada, fazendo com que ar se acumule nessa região e melhores resultados sejam conseguidos (Ver Figuras 48, 49 e 50).

Para a velocidade de 12 nós, a efetividade do casco sem fechamento é praticamente o mesmo que para a velocidade de 10 nós (16,6 % e 14,8 %).

Por outro lado, para o caso 3, com fechamento na popa, o resultado melhora mais ainda, alcançando uma efetividade de 19,2%. Nota-se pelas Figuras 49 e 50 que o fechamento da popa levou ao acúmulo de ar nessa região e, provavelmente, esse fato levou a uma diminuição na resistência fricional dessa área não observada no caso 2.

Tanto os resultados obtidos para o caso 2 e 3 são positivos, porém um possui maior efetividade para velocidades entre 8 e 10 nós e o outro para maiores velocidades, como pode ser visto nas curvas de resistência ao avanço ilustradas na Figura 54.

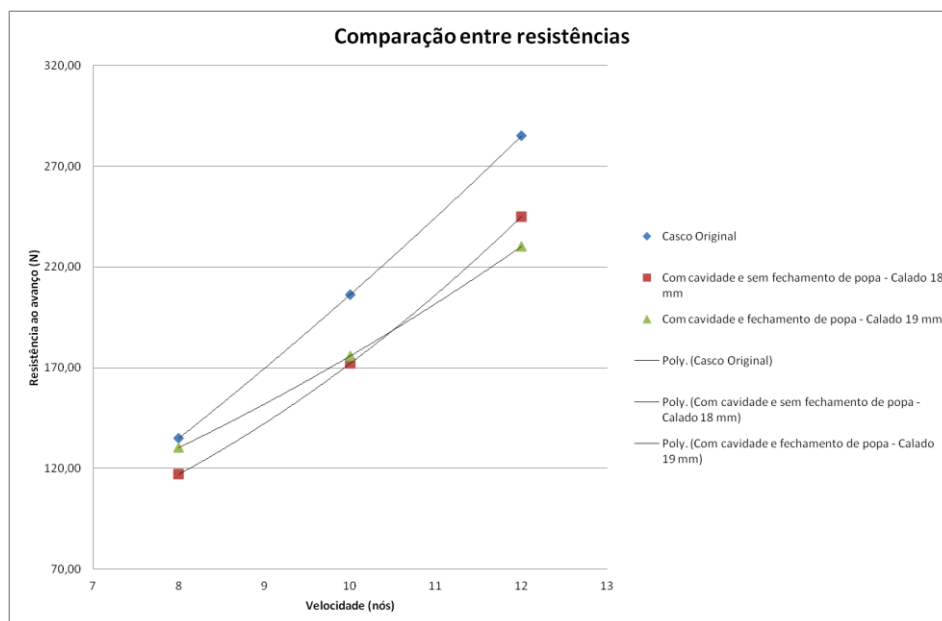


Figura 54 – Curvas de Resistência ao avanço.

7. CONCLUSÕES

O presente projeto de graduação teve como principal objetivo analisar a possibilidade de diminuição da resistência friccional de um casco através da injeção de ar em seu fundo. Esse objetivo foi alcançado com êxito através das análises preliminares realizadas.

Com essa possibilidade de diminuição da resistência ao avanço verificada é preciso fazer outros testes mais cuidadosos e que requeiram uma maior capacidade computacional. Um maior refinamento dos elementos de malha da cavidade seria necessário para obter resultados mais precisos.

Ao término do projeto, percebeu-se que melhores resultados podem ser obtidos testando-se outras configurações para a cavidade. Percebeu-se, por exemplo, que a camada de ar não foi eficiente para velocidades da embarcação abaixo de 8 nós e que também houve uma grande perda de carga no caminho entre o bocal de entrada e o início da cavidade de ar.

Análises dinâmicas também precisam ser realizadas para verificar a influência do comportamento dinâmico nos resultados, já que esta embarcação atinge região de semi-planeio e, conseqüentemente, não navega com trim nulo.

A camada de ar pode ter efeitos na estabilidade e capacidade de manobra da embarcação. Esses também precisam ser analisados para verificar se não há uma consequência negativa para o casco. Contudo, apesar da embarcação participar de uma corrida, as condições de mar e vento na região onde as provas são realizadas são bastantes tranquilas. Estas análises ficam como sugestão para projetos futuros que desejem verificar efeitos negativos para a camada de ar em casos de condições ambientais ruins.

Sendo assim, as análises aqui realizadas comprovam que a utilização da injeção de ar é uma solução eficaz quando se deseja diminuir a resistência ao avanço de uma embarcação em águas tranquilas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Disponível em: <<http://www.barcosolar.ufsc.br/blog/>>. Acesso em: 01 jul. 2013.

LARSSON, L.; RAVEN, H. C. **The Principles of Naval Architecture Series**. New Jersey: The Society of Naval Architects, v. Ship Resistance and Flow, 2010.

LATORRE, D. R. Ship hull drag reduction using bottom air injection. **Pergamon**, 24, 1995.

LAY, K. A. et al. Partial cavity drag reduction reduction at high reynolds numbers. **Journal of ship Research**, Junho 2010. 109-119.

DOĞRUL, ; ARIKAN, Y.; ÇELİK, F. A Numerical Investigation of Air Lubrication Effect on Ship. **International Conference on Ship Drag Reduction (Smooth-Ships)**, 20 maio 2010.

MATVEEV, K. I. **Modeling of vertical plane motion of an air cavity ship in waves**. California Institute of Technology. [S.l.]. 1999.

KAKUGAWA, A. et al. Experimental Study on microbubbles and their applicability to ship for skin friction reduction. **International Journal of Heat Fluid Flow**, 2000.

CECCIO, S. L.; MÄKI HARJU, S. A. **Air lubrification drag reduction on Great Lakes ship**. [S.l.]. 2012.

MATVEEV, K. Air-Cavity Ships are ready for a wider market, 2003.

SU, Y. et al. Numerical Simulation of a Planing Vessel at High Speed. **Journal of Marine Science and application**, Harbin, v. 11, p. 178-183, Junho 2011. ISSN 1671-9433(2012)02-0178-06.

INCORPORATION, S. I. **ANSYS 14.0 Help**. [S.l.]. 2011.

SILVA, R. G. D. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DE EMBARCAÇÕES. **PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**, Abril 2012.

DONG energy Solar Challenge. Disponível em: <<http://www.dongenergysolarchallenge.nl/en/>>. Acesso em: 12 Junho 2013.

GOMES, F. D. L. **Desenvolvimento de um modelo numérico em CFD para a estimativa da resistência de gerações de ondas**. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009.